L22DC

savills investment management

SAVILLS I.M. SGR S.P.A.
Sede: Via San Paolo
20121 Milano

LIN10
Via della Costa, 2, Treviglio (BG), 24047
Edificio Ad Uso Data Center

VALUTAZIONE IMPATTO AMBIENTALE
ai sensi degli artt. 23-25 del D.Lgs. n.152/2006

Studio di impatto sul microclima dell'esercizio dei Datacenter

---

Documento
4210_ES V SIM 01

Revisione
V.00

Data
Ottobre 2026

Proprietario
Savills I.M. SGR S.p.A

Il Tecnico
Ing. Carlo Grassi

Firmato digitalmente da:
PAOLA ENRICA FIORINI
Data: 28/10/2026 11:49:40

Paolo
Francesco
Lorenzo
Mauri
27.10.2026
17:08:22
GMT+01:00

Alvea

Environment,
Your Next
Asset

Progetto: 26.051.01.P

VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE

ai sensi degli artt. 23 del D.Lgs. 152/06

Progetto Nuovo Data Center Treviglio

STUDIO DI IMPATTO SUL MICROCLIMA DELL'ESERCIZIO DEI DATACENTER

Preparato per: Lombardini22

Data: 21/10/2026

0

VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE (VIA) DATA CENTER LIN10 TREVIGLIO

Studio di impatto sul microclima dell’esercizio dei Data center

Rev:	data	emissione	note
0	5/11/2026		

Redatto	Verificato	Approvato
C. Grassi	LP	PM

Sommario

1 INTRODUZIONE 6
1.1 Review tecnica di settore 7
2 DESCRIZIONE DEL MODELLO ENVI-met 9
2.1 Generalità 9
2.2 Modello atmosferico 9
2.3 Turbolenza atmosferica 10
2.4 Trasporto e bilancio termico dell'aria 10
2.5 Trasporto dell'umidità 11
2.6 Scambi radiativi 11
2.7 Scambi termici con superfici, suolo e vegetazione 11
3 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO 13
3.1 Inquadramento dell'area di studio e dominio di calcolo 13
3.2 Ricostruzione tridimensionale dell'area di studio 15
3.3 Configurazione della simulazione 16
3.4 Vegetazione e aree verdi 17
3.5 Rappresentazione delle sorgenti termiche 19
3.6 Scenari di simulazione 21
3.7 Assunzioni e criteri cautelativi di simulazione 21
4 ANALISI METEOROLOGICA E MICROCLIMATICA DEL SITO 23
4.1 Dati meteorologici disponibili 23
4.2 Regime termoigrometrico 23
4.3 Regime anemologico 25
4.4 Radiazione solare 26
4.5 Individuazione delle giornate rappresentative per le simulazioni 27
5 ANALISI DEI RISULTATI 30
5.1 Temperatura dell'aria 30
5.1.1 Variazione media annuale della temperatura dell'aria 33
5.1.2 Variazione della temperatura dell'aria ai recettori 37
5.1.3 Scenario post operam – sistemazione a verde 39
5.2 Umidità relativa 40
5.2.1 Variazione media annuale dell'umidità relativa 42
6 CONCLUSIONI 44

7 BIBLIOGRAFIA 45

ALLEGATI:

1. Dati di dissipazione del calore degli impianti

Indice Figure

Figura 1 Inquadramento dell'area di studio e dominio di calcolo ENVI-met. 14

Figura 2 Caratterizzazione dell'uso del suolo dell'area di studio. 15

Figura 3 Ricostruzione tridimensionale del dominio di calcolo in ENVI-met. In grigio scuro gli impianti air cooled-chillers. 16

Figura 4 Rappresentazione della vegetazione di progetto inserita nel modello ENVI-met nello scenario con sistemazioni a verde. 18

Figura 5 Rappresentazione tridimensionale – scenario post operam con sistemazioni a verde 18

Figura 6 Distribuzione dei chiller e potenza termica complessiva associata ai principali gruppi impiantistici. 20

Figura 7 Temperature giornaliere nel 2025. La fascia rappresenta l'intervallo minimo-massimo; le interruzioni corrispondono a giornate con copertura insufficiente. 24

Figura 8 Rosa annuale dei venti per classi di velocità. Le frequenze sono riferite alle ore con velocità almeno pari a 0,5 m/s. 25

Figura 9 Energia solare incidente mensile nel 2025 e valore medio giornaliero. Le barre chiare rappresentano l'energia complessiva mensile, mentre la linea blu indica la media giornaliera calcolata sulle giornate valide. 26

Figura 10 Profilo giornaliero medio della radiazione solare incidente per stagione. 27

Figura 11 Relazione tra temperatura esterna e potenza termica complessivamente dissipata dai 57 air cooled chiller. 29

Figura 12 Variazione della temperatura dell'aria al 25 marzo 2025 31

Figura 13 Variazione della temperatura dell'aria al 28 giugno 2025 32

Figura 14 Variazione della temperatura dell'aria al 26 luglio 2025 33

Figura 15 Variazione media annuale della temperatura dell'aria ANNO 2025 34

Figura 16 variazione spaziale della temperatura dell'aria ANNO 2025 – areali concentrici 35

Figura 17 variazione spaziale della temperatura dell'aria ANNO 2025 - celle 36

Figura 18 variazione spaziale della temperatura dell'aria ANNO 2025 - recettori 37

Figura 19 Riduzione della temperatura dell'aria dovuta alla vegetazione nello scenario del 28 giugno 2025 40

Figura 20 Variazione dell'umidità relativa dell'aria al 25 marzo 2025 40

Figura 21 Variazione dell'umidità relativa dell'aria al 28 giugno 2025 41

Figura 22 Variazione dell'umidità relativa dell'aria al 26 luglio 2025 42

Figura 23 Variazione media annuale umidità relativa – ANNO 2025 43

Indice tabelle

Tabella 1 Sintesi del dataset e dei controlli preliminari 23
Tabella 2 Parametri meteorologici delle giornate selezionate 28
Tabella 3 variazione media annuale della temperatura per ambito territoriale..... 35

Disclaimer

With this document, Alvea srl has fulfilled the commission entrusted to it by L22 with the required diligence.

The calculations and results illustrated in this document have been obtained in compliance with current regulations and recognised rules in the sector of operation and are based on the state of knowledge at the time of writing the report.

In this regard, Alvea srl has prepared this documentation in accordance with the information and specifications provided by the Client, who therefore assumes all responsibility for the accuracy and correctness of the same.

To this end, Alvea srlconsiders that:

- the client, or third parties designated by them, have provided all the correct information and complete documents for the execution of the commission.
- this document will not be used in a partial manner.
- the processing and results contained in this document will not be used for any purpose other than that agreed upon or for any other purpose, nor will they be transposed to modified circumstances without being re-examined.
- in this document, the term "Client" refers to the company "L22" which has commissioned "Alvea" to draft this document.

Con il presente documento, Alvea srl ha eseguito l'incarico affidatole da L22 con la dovuta diligenza.

I calcoli e i risultati illustrati nel presente documento sono stati ottenuti nel rispetto delle normative vigenti e delle regole riconosciute nel settore di attività e si basano sullo stato delle conoscenze al momento della stesura del rapporto.

A tal proposito, Alvea srl ha redatto la presente documentazione in conformità alle informazioni e alle specifiche fornite dal Cliente, che pertanto si assume ogni responsabilità in merito all'accuratezza e alla correttezza della stessa.

A tal fine, Alvea srl considera che:

- il Cliente, o terzi da lui designati, abbiano fornito tutte le informazioni corrette e la documentazione completa per l'esecuzione dell'incarico.
- il presente documento non verrà utilizzato in modo parziale.
- le elaborazioni e i risultati contenuti nel presente documento non verranno utilizzati per scopi diversi da quelli concordati o per qualsiasi altro scopo, né verranno trasposti a circostanze modificate senza essere riesaminati.
- nel presente documento, il termine "Cliente" si riferisce alla società "L22" che ha incaricato "Alvea" di redigere il presente documento.

1 INTRODUZIONE

Il presente studio è stato predisposto nell'ambito della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale relativa al progetto del Data Center LIN10, previsto in Via della Costa n. 2, nel Comune di Treviglio (BG).

L'intervento prevede la riqualificazione e rifunzionalizzazione di un complesso industriale esistente per la realizzazione di un'infrastruttura destinata ad uso Data Center. La configurazione progettuale comprende principalmente le aree destinate alle Data Hall e i relativi spazi tecnici e di supporto, oltre ai blocchi ad uso uffici e alle ulteriori strutture di servizio.

La tipologia di attività prevista comporta la presenza di rilevanti carichi termici, principalmente connessi al funzionamento continuativo delle apparecchiature informatiche e dei sistemi elettrici a servizio dell'infrastruttura. La rimozione del calore prodotto all'interno delle sale dati è affidata a un sistema di raffreddamento ad acqua refrigerata. In particolare, il progetto prevede chiller condensati ad aria installati sulle coperture, associati a Fanwall Unit all'interno delle Data Hall, CRAH nei principali locali elettrici e, in alcune sale dati, Cooling Distribution Unit dedicate al raffreddamento a liquido delle apparecchiature IT.

Il sistema di raffreddamento è costituito da circuiti idronici chiusi e non prevede, nelle normali condizioni di esercizio, l'impiego di torri evaporative. Il calore sottratto agli ambienti interni viene pertanto trasferito all'atmosfera esterna principalmente attraverso i sistemi di condensazione ad aria ubicati sulle strutture tecniche di copertura.

Alla presenza delle sorgenti di dissipazione termica si affianca la modifica delle caratteristiche fisiche e radiative delle superfici conseguente alla configurazione di progetto. Edifici, coperture, pavimentazioni, aree vegetate e strutture tecnologiche intervengono infatti nei processi di assorbimento, riflessione e restituzione dell'energia solare e negli scambi termici tra superficie e atmosfera, potendo determinare variazioni delle condizioni microclimatiche locali.

In tale contesto, il presente studio è finalizzato alla valutazione delle possibili modifiche del microclima locale associate alla realizzazione e all'esercizio del Data Center, con particolare riferimento alla temperatura dell'aria e all'umidità relativa, nonché al ruolo esercitato dalla radiazione solare, dalle caratteristiche delle superfici, dalla vegetazione e dalla circolazione atmosferica locale.

La valutazione è stata sviluppata mediante modellazione numerica tridimensionale con il software ENVI-met, specificamente concepito per lo studio delle interazioni tra atmosfera, edifici, suolo, vegetazione e radiazione. La modellazione consente di analizzare l'evoluzione spaziale e temporale delle principali variabili microclimatiche e di valutare gli effetti indotti dalla configurazione di progetto rispetto alle condizioni assunte come riferimento.

Particolare attenzione viene posta agli effetti in prossimità del suolo e nelle aree circostanti il sito, al fine di individuare eventuali variazioni delle condizioni termo-igrometriche presso le zone potenzialmente maggiormente esposte. L'analisi non è quindi limitata alle aree immediatamente adiacenti alle apparecchiature di dissipazione termica, ma considera anche la distribuzione e la propagazione degli effetti nel contesto esterno al Data Center.

Il progetto prevede inoltre specifiche misure rivolte alla riduzione del surriscaldamento locale, tra cui l'impiego di materiali ad elevata riflettanza solare e finiture di colore chiaro, la presenza di alberature e

superfici vegetate con funzione di ombreggiamento e la realizzazione di pensiline fotovoltaiche sulle aree di parcheggio.

Lo studio si propone pertanto di:

- caratterizzare le condizioni meteorologiche e microclimatiche dell'area di intervento;
- definire le condizioni meteorologiche maggiormente significative ai fini della simulazione;
- ricostruire le principali caratteristiche geometriche, superficiali e vegetazionali dell'area;
- rappresentare nel modello le principali sorgenti e superfici rilevanti ai fini degli scambi termici;
- valutare l'andamento della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa;
- quantificare le variazioni microclimatiche attribuibili alla configurazione di progetto;
- verificare la distribuzione spaziale degli effetti, con particolare attenzione alle aree poste al livello del suolo e ai punti di controllo esterni al sito;
- valutare il contributo delle misure progettuali previste per le sistemazioni a verde del surriscaldamento locale.

I risultati ottenuti saranno pertanto analizzati sia in termini di valori assoluti delle grandezze simulate, sia in termini di variazione rispetto alle condizioni di riferimento, in modo da fornire una valutazione quantitativa dell'effetto del progetto sul microclima locale.

1.1 Review tecnica di settore

La letteratura tecnico-scientifica evidenzia come i data center possano costituire sorgenti localizzate di calore antropogenico, poiché gran parte dell'energia elettrica assorbita dalle apparecchiature IT e dai sistemi ausiliari viene trasformata in calore e successivamente rimossa mediante gli impianti di raffreddamento. In assenza di sistemi di recupero energetico, tale calore viene trasferito all'ambiente esterno e può contribuire alla modifica delle condizioni microclimatiche locali. Questo aspetto è richiamato anche nella documentazione tecnica dedicata al recupero del calore prodotto dai data center.

L'entità dell'effetto dipende dalle caratteristiche specifiche dell'infrastruttura e del sito, tra cui la potenza termica dissipata, la tecnologia di raffreddamento, la quota e la modalità di rilascio del calore, la geometria degli edifici e le condizioni meteorologiche locali. In particolare, velocità e direzione del vento influenzano la dispersione del calore e la localizzazione delle aree maggiormente interessate sottovento.

Recenti studi basati su misure dirette confermano la possibilità di rilevare incrementi della temperatura dell'aria nelle aree circostanti. Sailor et al. (2026), sulla base di campagne di misura condotte presso quattro data center in esercizio, riportano incrementi sottovento fino a circa 2,2 °C, con valori medi dell'ordine di 0,7–0,9 °C e un segnale termico rilevabile fino a distanze dell'ordine di alcune centinaia di metri.

Ulteriori evidenze sono fornite da Marinoni et al. (2026), che hanno analizzato mediante telerilevamento la temperatura superficiale terrestre in prossimità di data center hyperscale, stimando un incremento medio della Land Surface Temperature di circa 2 °C dopo l'avvio dell'esercizio. Tale parametro non è direttamente assimilabile alla temperatura dell'aria prossima al suolo, ma costituisce un ulteriore indicatore della possibilità che infrastrutture energeticamente intensive producano effetti termici rilevabili a scala locale.

I valori riportati in letteratura non rappresentano soglie di riferimento né possono essere trasferiti direttamente al sito in esame, ma forniscono un utile ordine di grandezza per l'inquadramento del fenomeno. La valutazione dell'impatto richiede pertanto un'analisi sito-specifica, in grado di considerare congiuntamente le caratteristiche dell'impianto, la configurazione dell'area e le condizioni meteorologiche.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, nel caso di sorgenti che rilasciano prevalentemente calore sensibile, un aumento della temperatura dell'aria comporta, a parità di contenuto assoluto di vapore acqueo, una riduzione dell'umidità relativa. Nel caso del Data Center LIN10 di Treviglio, il sistema di raffreddamento previsto è costituito da chiller condensati ad aria e circuiti idronici chiusi, senza impiego di torri evaporative; le variazioni di umidità relativa possono quindi essere valutate principalmente in relazione alle variazioni di temperatura dell'aria simulate.

In tale quadro, l'utilizzo di un modello microclimatico tridimensionale consente di analizzare non solo la dissipazione termica degli impianti, ma anche il ruolo della radiazione solare, dell'ombreggiamento, delle caratteristiche delle superfici, della vegetazione e della geometria degli edifici nella determinazione delle condizioni microclimatiche locali.

2 DESCRIZIONE DEL MODELLO ENVI-met

2.1 Generalità

ENVI-met è un modello numerico tridimensionale e non idrostatico sviluppato per la simulazione del microclima a scala locale e delle interazioni tra atmosfera, edifici, superfici, suolo e vegetazione. Il software è stato concepito per rappresentare in modo integrato i principali processi fisici che governano il microclima urbano e periurbano, con particolare riferimento al campo di vento, alla temperatura e all'umidità dell'aria, agli scambi radiativi, ai flussi di calore e di vapore e alle interazioni con le superfici e la vegetazione. La versione utilizzata nel presente studio è ENVI-met 6.0.

Il modello opera su un dominio tridimensionale discretizzato mediante una griglia di calcolo, all'interno della quale vengono rappresentati gli edifici, le superfici pavimentate e naturali, il suolo e gli elementi vegetazionali. La risoluzione orizzontale è generalmente dell'ordine di pochi metri e le simulazioni vengono sviluppate su intervalli temporali dell'ordine di 24–48 ore, con passi temporali interni molto ridotti, dell'ordine di pochi secondi.

L'approccio adottato da ENVI-met è di tipo prognostico: le condizioni microclimatiche non sono ricavate mediante una semplice interpolazione di dati meteorologici, ma vengono calcolate attraverso la soluzione numerica delle equazioni che descrivono la dinamica atmosferica e gli scambi di energia e massa tra le diverse componenti del sistema.

Il modello consente pertanto di rappresentare l'evoluzione spaziale e temporale delle condizioni microclimatiche tenendo conto, tra gli altri, degli effetti della geometria degli edifici, dell'ombreggiamento, delle proprietà termiche e radiative delle superfici, della presenza della vegetazione, della radiazione solare e delle condizioni meteorologiche al contorno.

Le versioni più recenti del software hanno introdotto aggiornamenti rilevanti nella rappresentazione degli scambi radiativi e delle interazioni tra superfici, vegetazione e atmosfera.

Recenti studi di validazione hanno evidenziato che l'utilizzo dei moduli radiativi aggiornati, del forcing meteorologico completo e di proprietà locali dei materiali consente di migliorare sensibilmente la capacità del modello di riprodurre temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità del vento e temperatura media radiante. Ouyang et al. (2022), ad esempio, hanno evidenziato miglioramenti significativi delle prestazioni del modello utilizzando il sistema IVS, il forcing meteorologico completo e materiali sito-specifici.

2.2 Modello atmosferico

Il nucleo atmosferico di ENVI-met è basato sulla soluzione tridimensionale delle equazioni di conservazione della quantità di moto, della massa, dell'energia e del vapore acqueo. Il campo di velocità dell'aria è descritto attraverso le equazioni di Navier-Stokes nella formulazione Reynolds-averaged, integrate dalla condizione di continuità. In forma generale, per una componente della velocità ui, il bilancio della quantità di moto può essere espresso come segue:

$$\partial ui/\partial t + uj \cdot \partial ui/\partial xj = -(1/\rho) \cdot \partial p/\partial xi + \partial/\partial xj\,(km \cdot \partial ui/\partial xj) + Fi$$

dove ui rappresenta le componenti della velocità dell'aria, ρ è la densità dell'aria, p è la pressione, Km è il coefficiente di scambio turbolento della quantità di moto e Fi rappresenta i termini sorgente, comprese le interazioni con vegetazione e superfici.

Per un fluido trattato come incomprimibile, la conservazione della massa è espressa dalla relazione di continuità:

$$\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0$$

La soluzione congiunta di tali equazioni consente di ricostruire il campo tridimensionale di vento all'interno del dominio, rappresentando gli effetti di accelerazione, deviazione, separazione e ricircolo indotti dagli edifici e dagli altri ostacoli presenti.

2.3 Turbolenza atmosferica

La turbolenza è rappresentata mediante un modello di chiusura E–ε di ordine 1,5, appartenente alla famiglia dei modelli a due equazioni. ENVI-met risolve due equazioni prognostiche rispettivamente per l'energia cinetica turbolenta e per il relativo tasso di dissipazione. I coefficienti di scambio turbolento sono quindi determinati attraverso relazioni di tipo Prandtl-Kolmogorov.

La turbolenza determina l'efficienza con cui quantità di moto, calore e vapore vengono redistribuiti all'interno dell'atmosfera e costituisce pertanto un elemento essenziale nella simulazione della dispersione di un'anomalia termica generata da una sorgente di calore.

ENVI-met consente inoltre di selezionare, in alternativa alla chiusura prognostica E–ε, un modello diagnostico di primo ordine basato sulla mixing length. Nella configurazione ordinaria è tuttavia raccomandato l'impiego del modello E–ε.

2.4 Trasporto e bilancio termico dell'aria

La temperatura dell'aria viene trattata attraverso un'equazione tridimensionale di advezione-diffusione della temperatura potenziale. In forma generale, il bilancio può essere espresso come segue:

$$\partial\theta/\partial t + u \cdot \partial\theta/\partial x + v \cdot \partial\theta/\partial y + w \cdot \partial\theta/\partial z = \nabla \cdot (Kh\, \nabla\theta) + (1/(\rho\, cp)) \cdot \nabla Q_LW + S\theta$$

dove θ è la temperatura potenziale dell'aria, Kh è il coefficiente di scambio turbolento per il calore, cp è il calore specifico dell'aria, Q_LW rappresenta il contributo dei flussi radiativi a onda lunga e Sθ comprende i termini sorgente associati agli scambi di calore sensibile con superfici, edifici e vegetazione.

La temperatura dell'aria simulata non dipende quindi esclusivamente dalla temperatura meteorologica di ingresso, ma deriva dall'interazione tra advezione, diffusione turbolenta, radiazione e scambi convettivi con le superfici del dominio.

2.5 Trasporto dell'umidità

Il contenuto di vapore acqueo viene calcolato mediante un'equazione di trasporto analoga a quella utilizzata per il calore:

$$\partial q/\partial t + u \cdot \partial q/\partial x + v \cdot \partial q/\partial y + w \cdot \partial q/\partial z = \nabla \cdot (Kq\, \nabla q) + Sq$$

dove q rappresenta l'umidità specifica, Kq il coefficiente di diffusione turbolenta e Sq i termini sorgente legati agli scambi di vapore con vegetazione, suolo e superfici.

Il modello distingue quindi tra umidità specifica, rappresentativa della quantità effettiva di vapore contenuta nell'aria, e umidità relativa, che dipende anche dalla temperatura. Tale aspetto assume particolare rilievo, poiché un incremento della temperatura dell'aria associato alla dissipazione di calore può determinare una diminuzione dell'umidità relativa anche in assenza di una variazione significativa del contenuto assoluto di vapore.

2.6 Scambi radiativi

ENVI-met calcola separatamente i principali contributi radiativi a onda corta e a onda lunga. Per la radiazione a onda corta vengono considerate la componente solare diretta, la componente diffusa e la radiazione riflessa dalle superfici circostanti. Per la radiazione a onda lunga vengono invece considerati gli scambi termici tra cielo, terreno, edifici e vegetazione.

La radiazione netta incidente su una superficie può essere ricondotta, in forma semplificata, al seguente bilancio:

$$R_n = SW\downarrow - SW\uparrow + LW\downarrow - LW\uparrow$$

La componente riflessa della radiazione solare dipende dall'albedo, α, della superficie:

$$SW\uparrow = \alpha \cdot SW\downarrow$$

La radiazione termica emessa dalla superficie può invece essere descritta mediante la legge di Stefan-Boltzmann:

$$LW\uparrow = \varepsilon \cdot \sigma \cdot {T_s}^4$$

dove ε l'emissività della superficie, σ la costante di Stefan-Boltzmann e T_s la temperatura assoluta della superficie.

ENVI-met rappresenta inoltre le riflessioni multiple e l'effetto della geometria urbana attraverso il sistema Indexed View Sphere (IVS), che consente di determinare per ciascuna cella quali superfici, edifici e porzioni di vegetazione contribuiscono effettivamente al campo radiativo locale.

2.7 Scambi termici con superfici, suolo e vegetazione

ENVI-met rappresenta in modo accoppiato gli scambi termici tra atmosfera, superfici costruite, suolo e vegetazione.

Gli edifici costituiscono condizioni al contorno dinamiche del modello atmosferico e, per pareti e coperture, vengono considerate le principali proprietà radiative e termiche dei materiali, tra cui albedo, emissività, conducibilità e capacità termica.

Il bilancio energetico di una superficie può essere schematizzato come:

$$R_n = H + LE + G$$

dove R_n è la radiazione netta, H è il flusso di calore sensibile verso l'atmosfera, LE è il flusso di calore latente e G è il flusso conduttivo verso il materiale o il suolo.

Nelle superfici impermeabili il contributo latente risulta generalmente limitato, mentre assume maggiore rilevanza nel caso di terreni naturali e aree vegetate.

Il modello tiene inoltre conto dell'accumulo e della conduzione del calore all'interno delle strutture e del successivo rilascio verso l'ambiente esterno, consentendo di rappresentare l'inerzia termica delle superfici costruite. Il suolo è descritto attraverso l'evoluzione della temperatura e del contenuto idrico nei diversi strati, dai quali dipendono i flussi di calore e umidità scambiati con l'atmosfera. La vegetazione è invece rappresentata tridimensionalmente mediante parametri legati alla distribuzione fogliare, alla densità della chioma e alle caratteristiche fisiologiche; il modello considera gli scambi di quantità di moto, calore e vapore con l'atmosfera, nonché i processi di traspirazione ed evaporazione. La presenza di vegetazione può pertanto influenzare il microclima attraverso differenti meccanismi, tra cui l'ombreggiamento, la riduzione della radiazione solare incidente, la modifica locale del campo di vento e l'evapotraspirazione.

3 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO

Nel presente capitolo vengono descritte le modalità di costruzione e configurazione del modello ENVI-met. Sono illustrati il dominio di calcolo, la ricostruzione tridimensionale dell'area di studio, le principali impostazioni del modello, la rappresentazione della vegetazione e delle sorgenti termiche, nonché i dati meteorologici utilizzati come input alla simulazione.

3.1 Inquadramento dell'area di studio e dominio di calcolo

L'area oggetto di studio è localizzata nel Comune di Treviglio (BG), in corrispondenza del sito interessato dalla realizzazione del Data Center LIN10. Il dominio di calcolo è stato definito in modo da comprendere l'intero complesso di progetto e un'adeguata porzione del territorio circostante, così da rappresentare sia le condizioni microclimatiche interne al sito sia l'eventuale propagazione degli effetti termici verso le aree esterne e i recettori individuati.

Il dominio ENVI-met è stato discretizzato mediante una griglia tridimensionale costituita da 406 celle lungo l'asse x, 416 celle lungo l'asse y e 30 livelli lungo l'asse z. La risoluzione spaziale orizzontale è stata impostata pari a 3 m × 3 m, mentre il passo verticale di base è pari a 3 m. Il dominio presenta pertanto un'estensione planimetrica complessiva di circa 1.218 m × 1.248 m.

Per migliorare la rappresentazione dei processi prossimi al suolo, il livello verticale più basso è stato suddiviso in cinque sottocelle, consentendo una maggiore risoluzione nelle porzioni di atmosfera maggiormente interessate dagli scambi termici con superfici, vegetazione ed edifici.

Al di sopra della quota di 20 m è stata inoltre applicata una griglia verticale a passo crescente (*telescoping grid*), con un fattore di incremento pari al 20%. Tale impostazione consente di aumentare progressivamente lo spessore delle celle con la quota, mantenendo una maggiore risoluzione nella parte inferiore del dominio e riducendo al contempo l'onere computazionale nelle quote superiori.

La Figura seguente riporta l'inquadramento del dominio di calcolo su ortofoto, con indicazione del confine di proprietà, delle principali unità edilizie e impiantistiche, delle aree vegetate e dei recettori considerati nell'analisi.

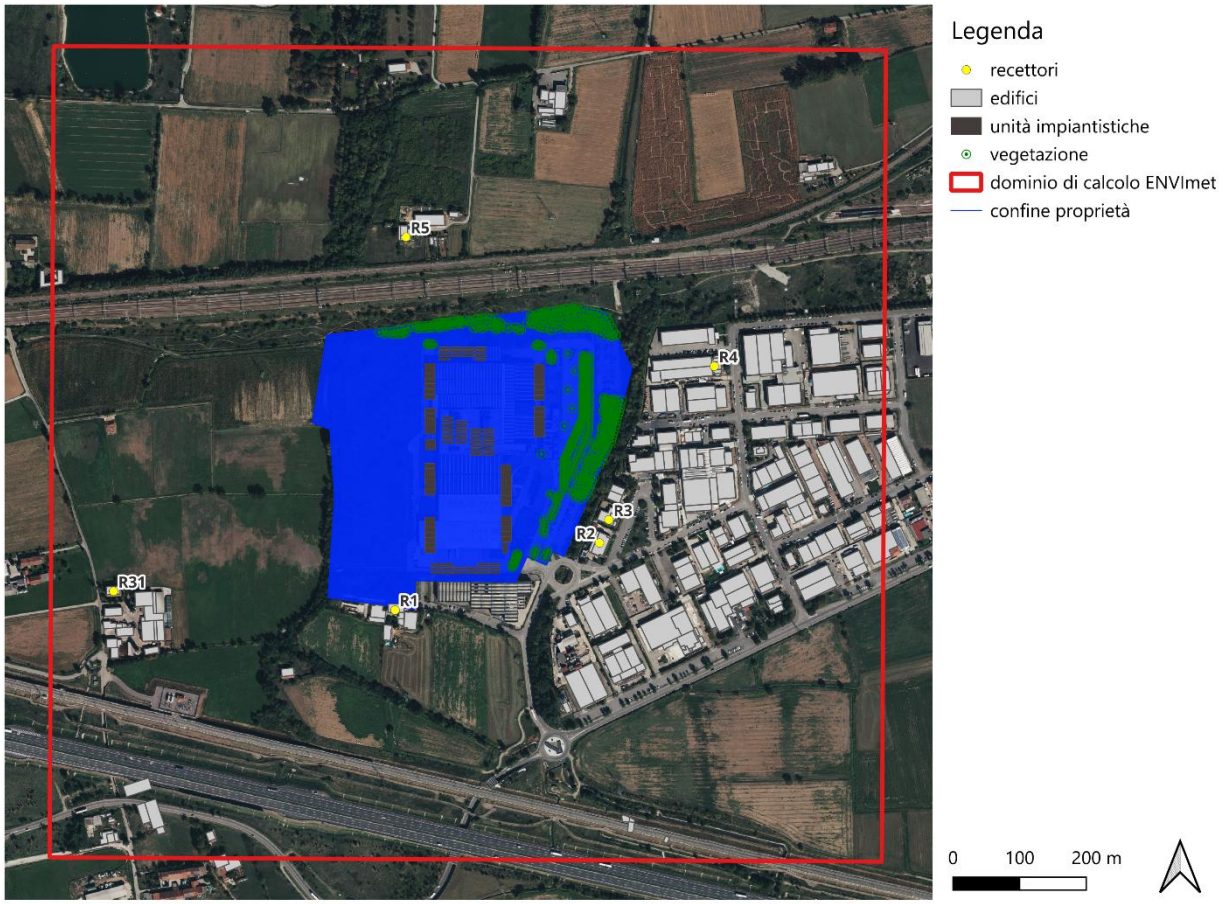


Figura 1 Inquadramento dell'area di studio e dominio di calcolo ENVI-met.

3.2 Ricostruzione tridimensionale dell'area di studio

La costruzione del modello è stata sviluppata a partire da una base cartografica predisposta in ambiente QGIS, nella quale sono stati organizzati e tematizzati i principali elementi territoriali e progettuali successivamente trasferiti in ENVI-met.

In particolare, sono stati predisposti specifici layer relativi agli edifici, alle unità impiantistiche, ai recettori, alla vegetazione e alle differenti classi di uso del suolo. Agli edifici sono state associate le relative altezze, così da consentirne la corretta restituzione tridimensionale nel modello, mentre i recettori sono stati georeferenziati come punti di controllo per la successiva analisi dei risultati.

La caratterizzazione dell'uso del suolo è stata effettuata distinguendo le principali tipologie di superficie presenti nel dominio e attribuendo a ciascuna di esse lo specifico codice previsto dalla libreria ENVI-met. Sono state così differenziate, tra le altre, le aree a terreno naturale e le superfici pavimentate, alle quali il modello associa differenti proprietà fisiche e termiche.

Figura 2 Caratterizzazione dell'uso del suolo dell'area di studio.

I layer così predisposti sono stati successivamente importati in ENVI-met mediante il plugin di integrazione con QGIS, mantenendo la corretta posizione geografica e gli attributi associati ai diversi elementi.

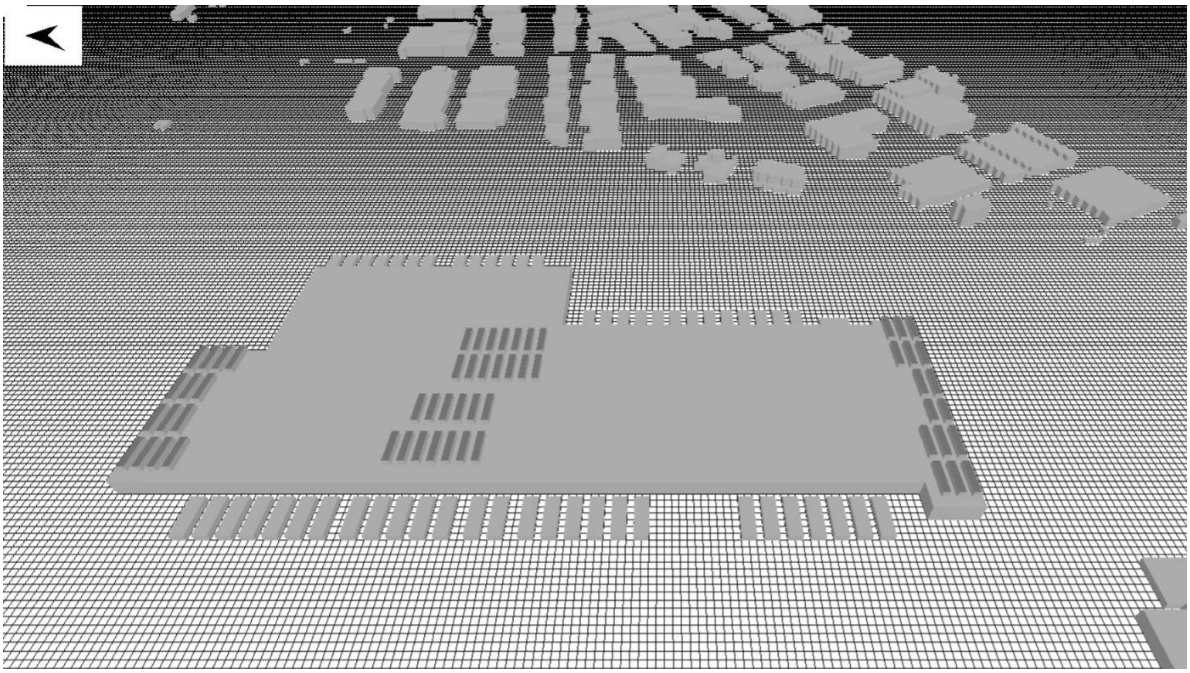


Figura 3 Ricostruzione tridimensionale del dominio di calcolo in ENVI-met. In grigio scuro gli impianti air cooled-chillers.

3.3 Configurazione della simulazione

Una volta completata la costruzione del dominio, sono state definite mediante ENVI-guide le impostazioni necessarie all'esecuzione della simulazione. La configurazione è stata predisposta per simulazioni della durata complessiva di 24 ore, con avvio alle ore 05:00. In luogo dell'analisi di un'unica giornata critica, sono state considerate tre giornate meteorologiche rappresentative di differenti condizioni termiche: il 25 marzo 2025, il 26 luglio 2025 e il 28 giugno 2025.

Per la definizione delle condizioni meteorologiche al contorno è stata utilizzata la modalità Full Forcing, mediante un apposito file meteorologico in formato .FOX. Tale modalità consente di imporre lungo i confini del dominio l'evoluzione temporale delle principali variabili meteorologiche, evitando l'impiego di condizioni costanti durante l'intera simulazione.

Nella configurazione adottata sono stati forzati la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità e la direzione del vento e le condizioni radiative, mentre non sono stati attivati il forcing delle precipitazioni e delle concentrazioni di fondo degli inquinanti.

I dati meteorologici utilizzati derivano dalle serie fornite dal Consorzio LaMMA. La disponibilità di serie temporali complete ha consentito non solo di ricostruire l'andamento meteorologico della giornata simulata, ma anche di individuare le condizioni maggiormente significative ai fini della valutazione degli effetti termici associati all'esercizio del Data Center. La selezione della giornata di simulazione è stata pertanto effettuata considerando condizioni potenzialmente favorevoli al manifestarsi di incrementi locali di temperatura, con particolare attenzione alla combinazione tra elevata temperatura dell'aria, intensa radiazione solare e condizioni di ventilazione ridotta o meno favorevoli alla dispersione del calore.

La configurazione della simulazione ha inoltre considerato l'effetto di Coriolis, mentre gli scambi radiativi sono stati gestiti attraverso le impostazioni radiative proprie del modello ENVI-met.

La caratterizzazione delle serie meteorologiche utilizzate e i criteri adottati per la selezione della giornata di simulazione sono approfonditi nel Capitolo 4.

3.4 Vegetazione e aree verdi

La vegetazione prevista dal progetto è stata rappresentata nel modello ENVI-met nell'ambito di uno specifico scenario con le sistemazioni a verde, finalizzato a valutarne il contributo alle condizioni microclimatiche locali. La configurazione adottata deriva dal progetto delle opere a verde, che prevede la realizzazione di fasce arboreo-arbustive lungo il perimetro del sito, aree a carattere boschivo, aiuole interne e filari lungo la viabilità. Tra le principali specie previste figurano Farnia (Quercus robur), Gelso bianco (Morus alba), Acero campestre (Acer campestre) e Carpino nero (Ostrya carpinifolia), associate a Corniolo (Cornus mas), Ligustro (Ligustrum vulgare) e Fusaggine (Euonymus europaeus)

Gli elementi vegetazionali sono stati inseriti nel dominio in posizione coerente con gli elaborati progettuali e rappresentati mediante i profili tridimensionali disponibili nella libreria ENVI-met, selezionando per ciascuna specie la tipologia maggiormente assimilabile in termini di forma e densità della chioma e sviluppo verticale. L'associazione adottata è riportata nella tabella seguente.

ID	Specie di progetto	Codice ENVI-met	Profilo utilizzato	Altezza
PL01	Quercus robur – Farnia	02SMDL	Spherical, dense, large	20 m
PL02	Morus alba – Gelso bianco	02SMDR	Spherical, dense, regular	10 m
PL03	Acer campestre – Acero campestre	02SMDR	Spherical, dense, regular	10 m
PL04	Ostrya carpinifolia – Carpino nero	02OMDM	Cylindric, dense, medium	15 m
PL06	Ligustrum vulgare – Ligustro	02OMDS	Generic, dense, small	5 m
PL07	Euonymus europaeus – Fusaggine	02OMDS	Generic, dense, small	5 m
PL08	Cornus mas – Corniolo	02OMDS	Generic, dense, small	5 m

Le altezze riportate non rappresentano pertanto valori puntuali riferiti ai singoli esemplari di progetto, ma corrispondono ai profili morfologici equivalenti utilizzati nella libreria ENVI-met. La scelta consente di rappresentare il diverso sviluppo della componente arborea e arbustiva e di considerarne gli effetti sull'ombreggiamento, sugli scambi di calore e umidità e sulla circolazione locale dell'aria.

Il confronto con la configurazione priva delle opere a verde consentirà quindi di valutare il contributo delle mitigazioni vegetazionali alla riduzione delle alterazioni microclimatiche associate all'intervento.

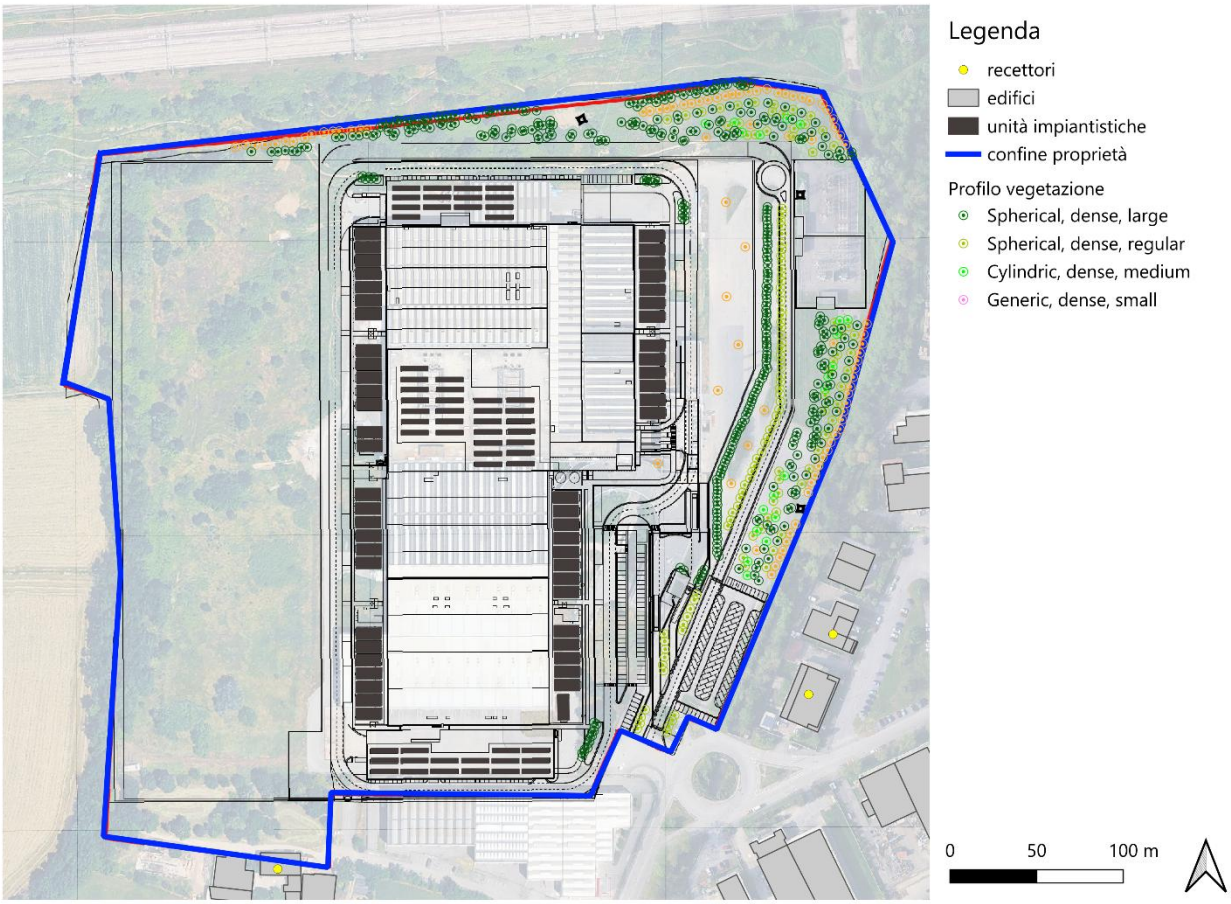


Figura 4 Rappresentazione della vegetazione di progetto inserita nel modello ENVI-met nello scenario con sistemazioni a verde.

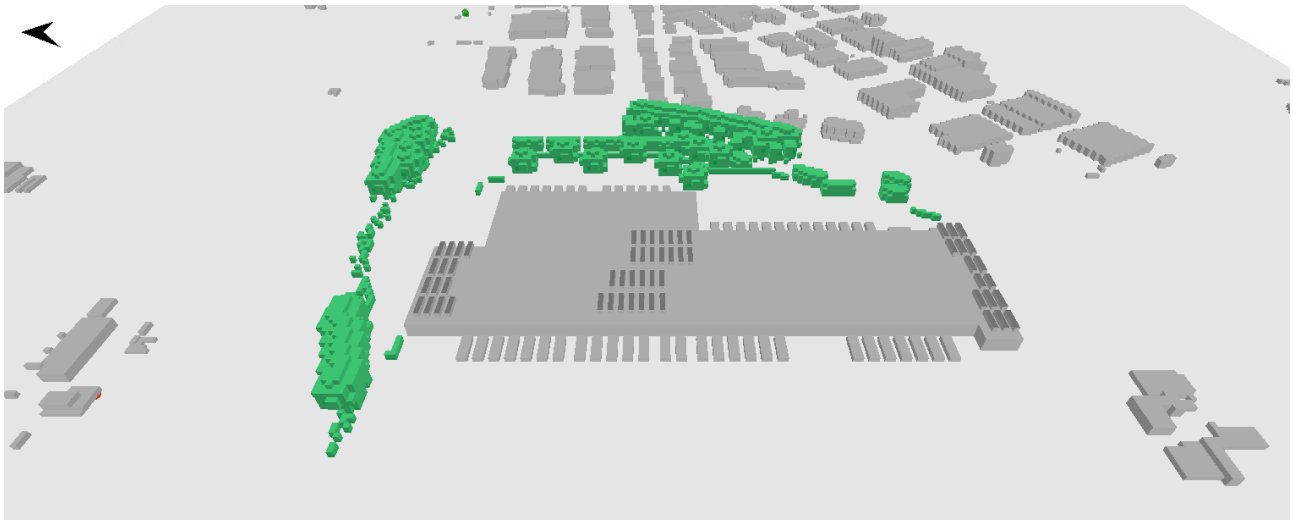


Figura 5 Rappresentazione tridimensionale – scenario post operam con sistemazioni a verde

3.5 Rappresentazione delle sorgenti termiche

La principale sorgente di calore associata all'esercizio del Data Center è costituita dai 57 chiller condensati ad aria previsti sulle coperture degli edifici. Questi trasferiscono all'atmosfera il calore rimosso dagli ambienti interni, insieme alla potenza assorbita durante il funzionamento. Sulle coperture sono inoltre previste unità esterne a servizio dei sistemi di ventilazione e degli impianti a espansione diretta, anch'esse responsabili di una dissipazione termica.

Nel modello ENVI-met i chiller sono stati rappresentati mediante sorgenti superficiali collocate nelle rispettive aree impiantistiche. Le unità sono state organizzate in tre gruppi in funzione della loro posizione, mantenendo la distribuzione prevista dal progetto. A ciascun chiller è stata assegnata, nelle simulazioni delle tre giornate considerate, una potenza termica costante pari a 1.600 kW. In tale valore è stato incluso, in forma aggregata, anche il contributo delle altre unità esterne presenti sulle coperture. Queste ultime non sono state pertanto rappresentate mediante sorgenti distinte, ma la relativa dissipazione termica è stata ricompresa nelle sorgenti associate ai chiller.

La potenza termica effettivamente respinta varia in funzione della temperatura dell'aria esterna e delle condizioni di carico dell'impianto. Il valore complessivamente assegnato a ciascuna sorgente, pari a 1.600 kW, è rappresentativo di una condizione di funzionamento del sistema con una temperatura esterna di circa 35 °C. L'adozione dello stesso valore per tutte le sorgenti e per l'intera durata delle simulazioni costituisce un'impostazione cautelativa, poiché assimila il funzionamento delle apparecchiature a una condizione estiva gravosa e non considera la riduzione della potenza dissipata nelle ore caratterizzate da temperature esterne inferiori o da carichi frigoriferi più contenuti.

Il profilo prestazionale variabile dei chiller e delle unità esterne restituisce circa 775.817 MWh/anno, come mostrato dai calcoli tecnici di progetto. Al fine di simulare l'emissione di calore si è provveduto a stimare un valore medio della potenza termica dissipata in funzione della temperatura dell'aria esterna. L'ipotesi di lavoro ha individuato in 1600 kW il valore da associare ad ognuno dei 57 chillers.

Nelle poche ore caratterizzate dalle temperature esterne più elevate, la potenza istantanea dissipata può superare 1.600 kW per unità. Il valore adottato non rappresenta pertanto il massimo picco istantaneo possibile, ma una potenza equivalente cautelativa rispetto alla quantità complessiva di calore dissipata. Il contributo delle altre unità esterne non è rappresentato separatamente nella relativa posizione puntuale, essendo stato incluso nelle sorgenti associate ai chiller.

Per l'inserimento in ENVI-met, la potenza di ciascuna sorgente è stata rapportata alla superficie emissiva considerata secondo la relazione:

$$q'' = \frac{Q}{A}$$

dove q'' è la densità superficiale di potenza termica, Q la potenza assegnata al chiller e A la superficie emissiva. Considerando 1.600 kW per ogni macchinario ed una superficie di circa 26,2 m², è stata impostata una emissione pari a circa 61.000 W/m².

La figura seguente mostra la posizione dei tre gruppi di chiller e delle principali aree di dissipazione termica rappresentate nel modello.

Figura 6 Distribuzione dei chiller e potenza termica complessiva associata ai principali gruppi impiantistici.

3.6 Scenari di simulazione

Al fine di distinguere gli effetti microclimatici riconducibili alla realizzazione del Data Center da quelli associati alle opere di sistemazione a verde, sono stati definiti tre distinti scenari di simulazione.

Il primo scenario rappresenta la configurazione ante operam, ovvero le condizioni dell'area in assenza del Data Center.

Il secondo scenario rappresenta invece la configurazione post operam, comprendente gli edifici e le componenti impiantistiche previste dal progetto, incluse le sorgenti termiche associate al funzionamento dei chiller.

Il terzo scenario, denominato post operam con sistemazioni a verde, considera la medesima configurazione progettuale integrata con le opere a verde previste.

Per tutti gli scenari sono state mantenute le medesime condizioni meteorologiche, la stessa estensione e discretizzazione del dominio e le medesime impostazioni di calcolo. Il confronto ante e post operam rappresenta l'effetto complessivo del progetto; il contributo dei soli chiller non è quindi separabile dalle altre modifiche introdotte come la geometria degli edifici.

.

3.7 Assunzioni e criteri cautelativi di simulazione

Nella costruzione della sintesi annuale sono state adottate le seguenti assunzioni cautelative. La caratterizzazione del dataset meteorologico, i criteri di selezione delle giornate e l'analisi delle condizioni di temperatura, radiazione solare e vento sono approfonditi nel Capitolo 4.

- Giornate rappresentative delle fasce termiche: le tre giornate simulate rappresentano le fasce di temperatura media giornaliera 0-10 °C, 10-20 °C e 20-30 °C. Per ciascuna fascia è stata selezionata una giornata con temperatura media prossima al limite superiore dell'intervallo e temperatura massima giornaliera superiore a tale limite.
- Utilizzo dell'intervallo orario più caldo: per ciascuna giornata è stato considerato l'intervallo orario nel quale si registra la temperatura dell'aria più elevata.
- Estensione della condizione più gravosa: la variazione microclimatica calcolata nell'intervallo più caldo è stata assunta come rappresentativa di tutte le ore dell'anno appartenenti alla corrispondente fascia termica. Non sono state quindi considerate le riduzioni dell'impatto attese nelle ore meno calde.
- Potenza termica costante: in tutte le simulazioni è stata assegnata a ciascuna sorgente una potenza termica costante pari a 1.600 kW, rappresentativa di una condizione di funzionamento con temperatura esterna prossima a 35 °C. La stessa potenza è stata mantenuta anche nelle giornate caratterizzate da temperature inferiori.
- Direzione del vento: nell'intervallo orario selezionato il vento proviene da sud in tutte e tre le giornate. I pennacchi termici presentano quindi una direzione di propagazione concorde e la loro combinazione tende a concentrare l'effetto nelle medesime aree sottovento, senza considerare la variabilità annuale della direzione del vento.

- Aggregazione annuale equivalente: i tre delta grid sono stati combinati applicando i pesi corrispondenti alla frequenza annuale delle rispettive fasce termiche. Il risultato costituisce una stima annuale equivalente in condizioni cautelative e non una simulazione continua delle 8.760 ore del 2025.

4 ANALISI METEOROLOGICA E MICROCLIMATICA DEL SITO

L'analisi del dataset meteorologico orario di Treviglio per il 2025 descrive il contesto climatico nel quale è inserito il Data Center: un'area pianeggiante della Pianura Padana, caratterizzata in estate da temperature elevate, forte radiazione solare e ventilazione generalmente moderata o debole. La massima annuale registrata è pari a 35,3 °C, mentre il 46,0% delle ore valide presenta velocità del vento non superiori a 2,0 m/s. Tali condizioni possono ridurre il ricambio d'aria negli spazi esterni e rendere meno efficace la dispersione del calore prodotto dagli impianti, soprattutto durante le ore centrali delle giornate estive.

Il contesto territoriale pianeggiante e la frequente stabilità atmosferica estiva favoriscono inoltre la persistenza delle condizioni di caldo e il verificarsi di situazioni caratterizzate da ventilazione limitata. Sulla base dello screening congiunto di temperatura dell'aria, radiazione solare e velocità del vento sono state selezionate le tre giornate oggetto delle simulazioni microclimatiche, rappresentative delle condizioni metereologiche di maggiore interesse per la valutazione. La scelta delle tre giornate e i relativi criteri di selezione sono descritti più dettagliatamente nel Capitolo 4.5.

4.1 Dati meteorologici disponibili

La caratterizzazione microclimatica è stata sviluppata utilizzando i dati meteorologici orari relativi all'anno 2025, forniti dal Consorzio LaMMA (Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica Ambientale per lo sviluppo sostenibile), organismo che elabora dati e modelli meteorologici e ambientali a supporto del monitoraggio del territorio e della valutazione delle condizioni atmosferiche. Il dataset comprende temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità e direzione del vento, radiazione solare a onda corta, nuvolosità e precipitazione. Gli orari sono espressi in UTC; durante il periodo estivo l'ora locale italiana corrisponde a UTC+2.

Il file contiene 8.760 record, uno per ciascuna ora dell'anno, senza duplicazioni né discontinuità nella sequenza temporale. Il valore -999,9 è stato interpretato come indicatore di dato mancante ed escluso dalle elaborazioni. La disponibilità risulta pari al 98,7% per la temperatura e al 98,9% per le altre variabili principali. Per lo screening estivo sono state considerate soltanto le giornate con almeno 20 ore valide e con dati completi tra le 10:00 e le 16:00 UTC; il campione finale comprende 87 giornate su 92.

Tabella 1 Sintesi del dataset e dei controlli preliminari

Voce	Risultato
Periodo	1 gennaio 2025 ore 00:00 - 31 dicembre 2025 ore 23:00 UTC
Risoluzione temporale	1 ora
Record complessivi	8.760
Temperatura valida	8.647 ore 98,7%
Vento radiazione e umidità validi	8.662 ore 98,9%

4.2 Regime termoigrometrico

L'analisi delle osservazioni meteorologiche orarie relative al 2025 evidenzia, per l'area di Treviglio, un regime termoigrometrico caratterizzato da una marcata variabilità stagionale. La temperatura media annua calcolata

sulle ore valide è pari a 14,0 °C. Il valore minimo, −2,4 °C, è stato registrato il 14 gennaio alle ore 07:00 UTC, mentre il massimo annuale, pari a 35,3 °C, si è verificato il 14 agosto alle ore 15:00 UTC. Nel trimestre estivo giugno–agosto la temperatura media raggiunge 24,5 °C, mentre l'umidità relativa media è pari al 74,3%.

L'andamento annuale mostra un progressivo incremento delle temperature dalla primavera verso l'estate, con i valori più elevati concentrati tra la seconda metà di giugno e la prima parte di luglio. In questo intervallo si osserva una fase prolungata di condizioni termiche gravose, caratterizzata da temperature massime giornaliere frequentemente superiori a 30 °C. Un secondo episodio caldo si manifesta nella prima metà di agosto, con una temperatura media giornaliera prossima a 29,4 °C.

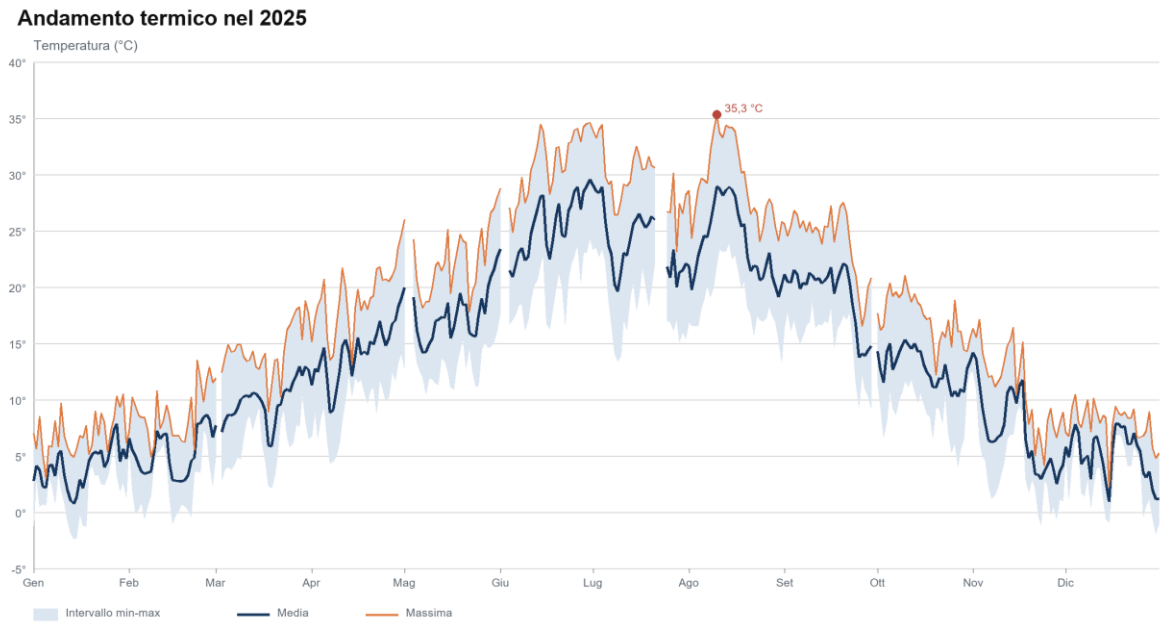


Figura 7 Temperature giornaliere nel 2025. La fascia rappresenta l'intervallo minimo-massimo; le interruzioni corrispondono a giornate con copertura insufficiente.

La combinazione di temperatura elevata e umidità relativa significativa non incide soltanto sulle condizioni termoigrometriche interne al Data Center, ma può influenzare anche il microclima nelle aree limitrofe.

In presenza di aria già calda e umida, l'energia termica dissipata verso l'esterno, può determinare un incremento locale della temperatura dell'aria e modificare i normali scambi termici con il suolo e con gli edifici circostanti.

L'entità di tale effetto dipende dalla potenza termica respinta, dalla durata di funzionamento degli impianti, dalla geometria dell'area e dalle condizioni anemologiche.

Le situazioni potenzialmente più critiche si verificano durante le giornate estive caratterizzate da temperature elevate, umidità persistente e ventilazione debole, poiché la ridotta capacità di ricambio dell'aria può favorire l'accumulo del calore antropico e limitare la dispersione del pennacchio termico prodotto dai chiller.

Durante le ore serali e notturne viene meno l'apporto della radiazione solare e le superfici tendono a raffreddarsi mediante emissione radiativa a onda lunga. La contemporanea riduzione del rimescolamento atmosferico può, in determinate condizioni di stabilità e ventilazione debole, favorire la persistenza del calore antropico negli strati prossimi al suolo. L'entità di tale fenomeno dipende tuttavia dalle condizioni meteorologiche e non può essere assunta a priori come maggiore rispetto alle ore diurne.

4.3 Regime anemologico

La velocità media annua del vento è 2,28 m/s e la mediana è 2,1 m/s; il novantesimo percentile raggiunge 3,7 m/s. Le ore con velocità non superiore a 1,0 m/s rappresentano il 12,9% del totale valido, mentre la quota con velocità non superiore a 2,0 m/s sale al 46,0%. Nel trimestre estivo la velocità media è 2,55 m/s.

La rosa dei venti mostra una distribuzione ampia, con maggiore frequenza dei settori orientali e una componente secondaria occidentale. I settori ENE, ESE ed E rappresentano complessivamente circa il 27,9% delle ore non calme; WSW e W contribuiscono per circa il 15,8%. La direzione è stata esclusa dal calcolo per velocità inferiori a 0,5 m/s, poiché in tali condizioni risulta poco rappresentativa.

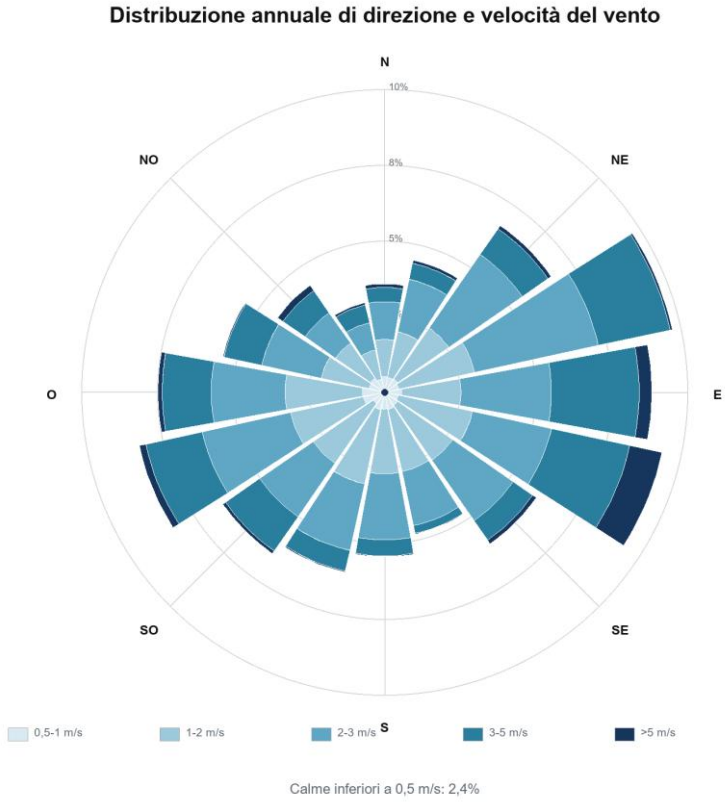


Figura 8 Rosa annuale dei venti per classi di velocità. Le frequenze sono riferite alle ore con velocità almeno pari a 0,5 m/s.

4.4 Radiazione solare

L'analisi della radiazione solare incidente è stata effettuata sull'intera serie meteorologica oraria disponibile. La copertura valida della variabile è pari al 98,9% delle ore annuali.

Il valore medio annuo della radiazione solare incidente è pari a circa 182 W/m², mentre l'energia complessivamente integrata raggiunge circa 1.580 kWh/m². L'andamento mensile evidenzia una marcata variabilità stagionale. I valori più elevati si concentrano tra la tarda primavera e l'estate, con un massimo dell'energia mensile in giugno, pari a circa 242,6 kWh/m², seguito da luglio con 231,7 kWh/m² e agosto con 200,7 kWh/m². Nei mesi invernali l'energia disponibile risulta sensibilmente inferiore, con valori medi mensili pari a circa 34,7 kWh/m² in gennaio e 28,9 kWh/m² in dicembre.

La media giornaliera dell'energia solare raggiunge il valore più elevato nei mesi estivi, con circa 8,2 kWh/m² al giorno in giugno e 7,7 kWh/m² al giorno in luglio. La mediana giornaliera estiva è pari a circa 8,4 kWh/m² in giugno e 8,1 kWh/m² in luglio. La banda compresa tra il 10° e il 90° percentile mostra tuttavia una variabilità significativa tra le giornate, riconducibile alla presenza di nuvolosità e condizioni atmosferiche variabili.

Il massimo medio della radiazione solare si osserva in estate, con valori prossimi a 894 W/m² nelle ore centrali della giornata. In primavera il picco raggiunge circa 731 W/m², mentre in autunno e in inverno risulta progressivamente più contenuto, attestandosi rispettivamente intorno a 526 W/m² e 337 W/m². Oltre alla diversa intensità dei massimi stagionali, varia anche la durata del periodo giornaliero caratterizzato da radiazione significativa: in estate il ciclo radiativo è più lungo e distribuito nell'arco della giornata, mentre in inverno è più breve e concentrato principalmente nelle ore centrali.

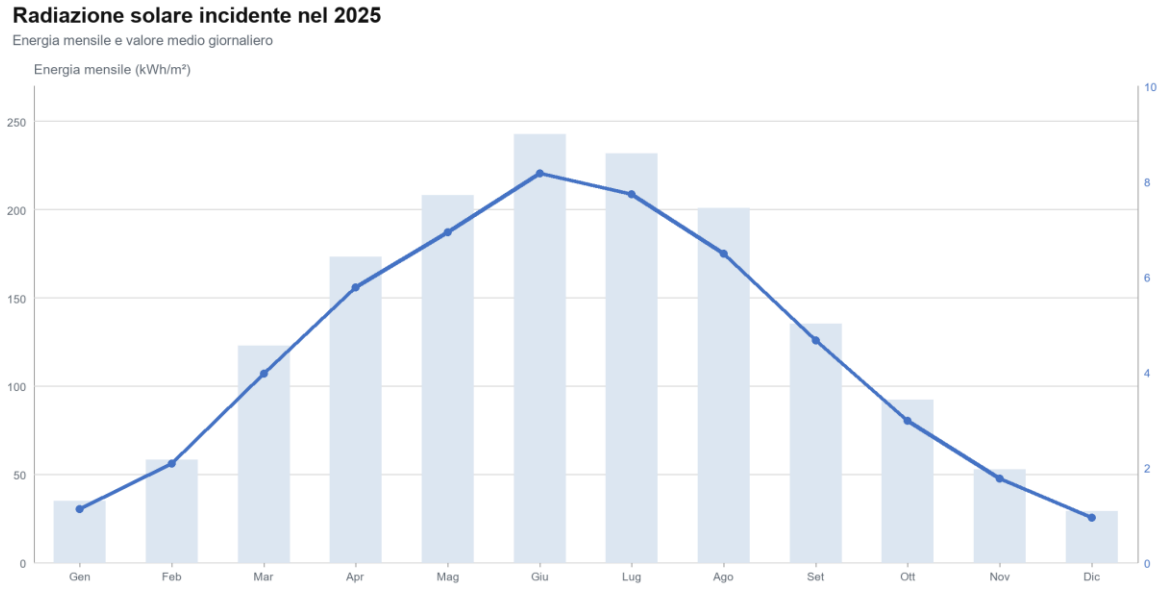


Figura 9 Energia solare incidente mensile nel 2025 e valore medio giornaliero. Le barre chiare rappresentano l'energia complessiva mensile, mentre la linea blu indica la media giornaliera calcolata sulle giornate valide.

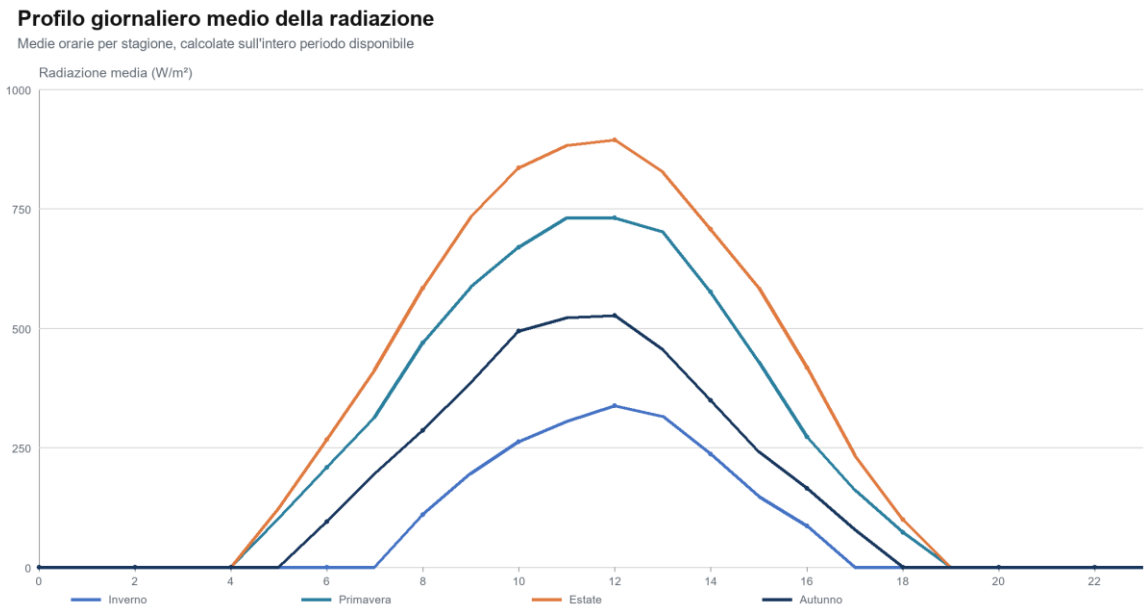


Figura 10 Profilo giornaliero medio della radiazione solare incidente per stagione.

4.5 Individuazione delle giornate rappresentative per le simulazioni

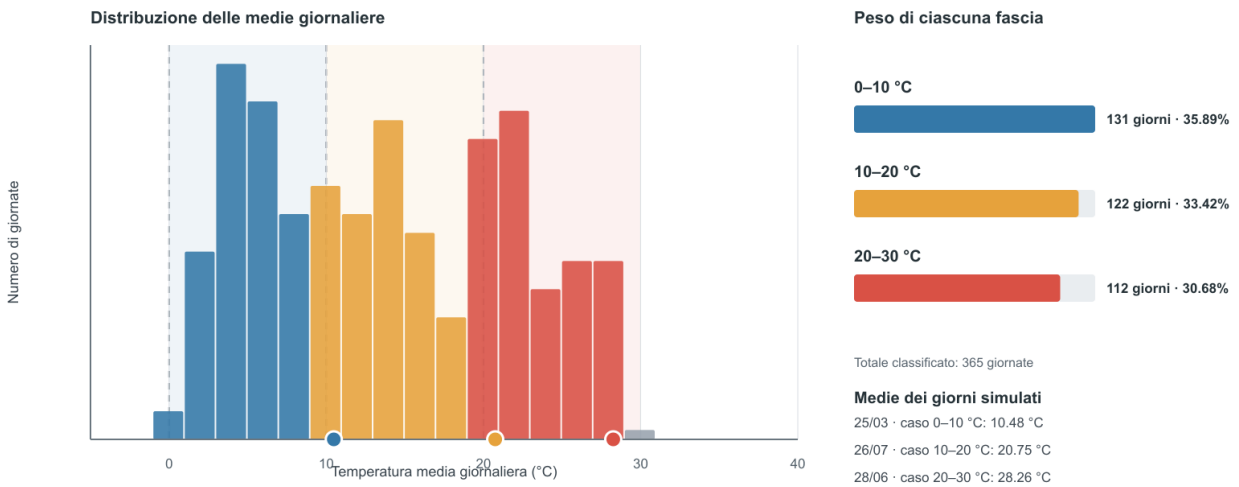
Le simulazioni non sono state riferite a un'unica giornata, ma a tre giornate di riferimento, rappresentative delle diverse condizioni termiche del 2025 e selezionate secondo un criterio cautelativo. La selezione è stata impostata per descrivere tre fasce di temperatura dell'aria: 0-10 °C, 10-20 °C e 20-30 °C. Per ciascuna fascia è stata individuata una giornata con un profilo meteorologico completo e utilizzabile nel modello ENVI-met, mantenendo coerenti temperatura, umidità relativa, radiazione solare, velocità e direzione del vento.

Le giornate selezionate presentano una temperatura media collocata nella parte superiore della rispettiva fascia o leggermente superiori al limite e una temperatura massima giornaliera superiore al limite superiore della fascia stessa. La selezione privilegia pertanto, per ciascun intervallo termico, profili caratterizzati da temperature diurne relativamente elevate rispetto alle condizioni prevalenti nella corrispondente classe. Tale impostazione introduce un criterio cautelativo nella scelta delle condizioni meteorologiche impiegate per la costruzione della sintesi annuale equivalente.

Le tre giornate di riferimento sono il 25 marzo 2025 per la fascia 0-10 °C, il 26 luglio 2025 per la fascia 10-20 °C e il 28 giugno 2025 per la fascia 20-30 °C. La rappresentatività annuale è stata quindi determinata utilizzando le medie giornaliere della temperatura dell'aria del dataset meteorologico 2025: 131 giornate ricadono nella fascia 0-10 °C, 122 nella fascia 10-20 °C e 112 nella fascia 20-30 °C. I pesi applicati al calcolo annuale sono pertanto rispettivamente 35,89%, 33,42% e 30,68%. I principali parametri meteorologici dei profili selezionati sono riepilogati nella tabella seguente.

Tabella 2 Parametri meteorologici delle giornate selezionate

Fascia nominale e peso	Giornata	T media giornaliera	T massima	Energia solare giornaliera	UR al record di T massima	Vento al record di T massima
0-10 °C 35,89%	25 marzo 2025	10,48 °C	16,45 °C	5,29 kWh/m²	56,1%	1,8 m/s 182,3° (S)
10-20 °C 33,42%	26 luglio 2025	20,75 °C	26,45 °C	7,34 kWh/m²	50,5%	3,3 m/s 147,3° (SSE)
20-30 °C 30,68%	28 giugno 2025	28,26 °C	34,08 °C	8,43 kWh/m²	35,7%	2,3 m/s 159,0° (SSE)



La scelta a fasce consente di descrivere l'effetto microclimatico dell'infrastruttura in condizioni stagionali differenti. Il calore rilasciato dai chiller costituisce una sorgente sensibile per l'atmosfera, mentre radiazione solare, ventilazione, geometria degli edifici, superfici e vegetazione controllano il trasporto e la diluizione dell'energia termica immessa. L'analisi annuale non rappresenta quindi la previsione di una singola giornata, ma la combinazione pesata di tre condizioni meteorologiche rappresentative.

In prima approssimazione, la potenza termica respinta dal condensatore può essere espressa come:

$$Qr_ej(T_ext) = Q_cool + P_{el}(T_ext)$$

dove Q_cool è la potenza frigorifera utile e Pel la potenza elettrica assorbita dal chiller.

Poiché quest'ultima varia al variare della temperatura esterna, come si può vedere nella figura seguente, e delle condizioni di condensazione, il calore da smaltire comprende sia il carico frigorifero sia l'equivalente termico della potenza di compressione.

Il grid annuale è stato ottenuto per ciascuna cella mediante media pesata dei tre delta grid:

$$\Delta T_annuo = 0{,}3589 \cdot \Delta T_0\text{-}10 + 0{,}3342 \cdot \Delta T_10\text{-}20 + 0{,}3068 \cdot \Delta T_20\text{-}30.$$

La stessa procedura può essere applicata alle altre grandezze termoigrometriche, purché i grid siano riferiti alla stessa geometria, quota e ora di confronto.

Per mantenere la rappresentatività delle simulazioni, ciascun caso utilizza il profilo orario completo della relativa giornata, mantenendo allineati temperatura, umidità relativa, direzione e velocità del vento e radiazione solare. La modalità Full Forcing del Forcing Manager consente di imporre queste variabili nel tempo. I risultati delle tre simulazioni sono poi confrontati cella per cella e aggregati secondo i pesi ricavati dalla distribuzione giornaliera del 2025.

La figura seguente colloca sulla curva prestazionale i tre casi simulati, utilizzando le rispettive temperature massime giornaliere del profilo meteorologico: 16,45 °C il 25 marzo, 26,45 °C il 26 luglio e 34,08 °C il 28 giugno. Le potenze indicate sono letture indicative della curva disponibile.

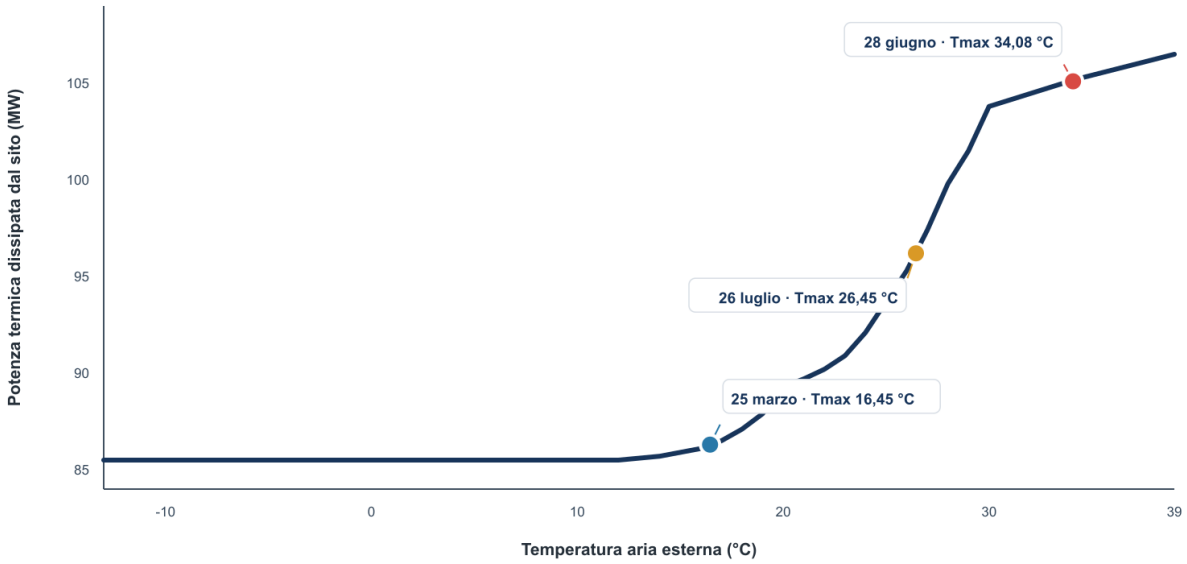


Figura 11 Relazione tra temperatura esterna e potenza termica complessivamente dissipata dai 57 air cooled chiller.

5 ANALISI DEI RISULTATI

Il presente capitolo introduce l'analisi delle variazioni delle condizioni microclimatiche associate alla configurazione di progetto, considerando sia la temperatura dell'aria sia l'umidità. Il confronto è effettuato tra gli scenari ante operam e post operam, ottenuti mediante il modello ENVI-met, al fine di individuare le modifiche indotte dalla configurazione progettuale e valutarne la distribuzione spaziale all'interno dell'area di studio.

L'analisi è riferita alle giornate del 25 marzo, 28 giugno e 26 luglio 2025. Le mappe rappresentano le differenze dei principali parametri microclimatici calcolate tra i due scenari sulla griglia di simulazione, alla quota di 1,50 m dal suolo. In particolare, vengono esaminate le variazioni della temperatura dell'aria e dell'umidità, espresse secondo le unità di misura e le scale cromatiche riportate nelle rispettive legende.

5.1 Temperatura dell'aria

Le mappe della variazione di temperatura dell'aria evidenziano, per le tre date analizzate, una zona di maggiore differenza in corrispondenza dell'edificio principale e nelle aree immediatamente adiacenti. Tale zona presenta una forma prevalentemente allungata, influenzata anche dalla direzione e dall'intensità del vento, e si estende progressivamente all'esterno dell'area edificata.

Per il 25 marzo 2025, la massima variazione è localizzata in prossimità dell'edificio principale e ricade nella classe superiore a 1,80 °C. Allontanandosi da tale area, i valori diminuiscono gradualmente, fino a raggiungere le classi più basse nella maggior parte del dominio rappresentato.

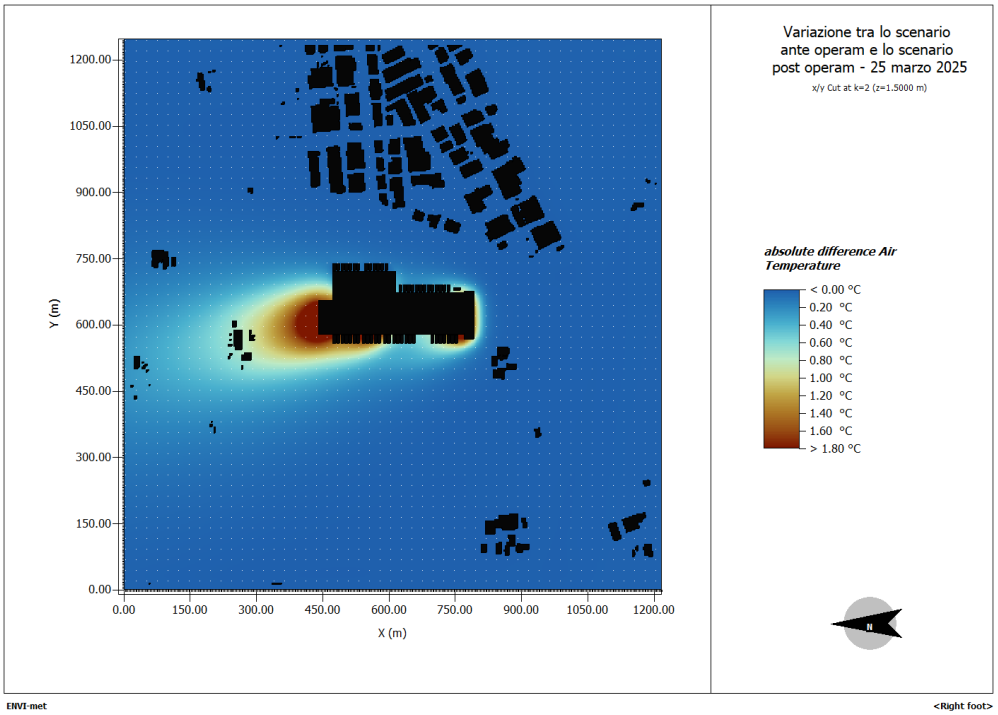


Figura 12 Variazione della temperatura dell'aria al 25 marzo 2025

La mappa del 28 giugno 2025 mostra una distribuzione analoga, con una zona di maggiore variazione presso l'edificio e una fascia più ampia caratterizzata da valori intermedi. Anche in questo caso, il massimo locale appartiene alla classe superiore a 1,80 °C, mentre la variazione si attenua all'aumentare della distanza dalla zona centrale.

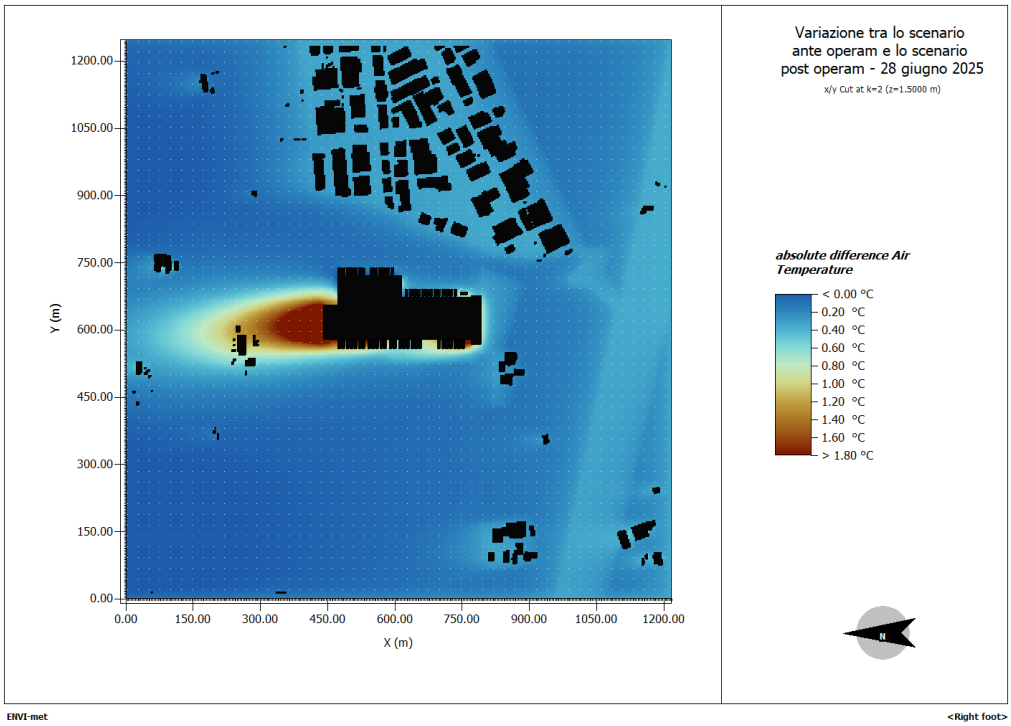


Figura 13 Variazione della temperatura dell'aria al 28 giugno 2025

Per il 26 luglio 2025 si riconosce una configurazione spaziale comparabile, con una fascia allungata di maggiore variazione adiacente all'edificio.

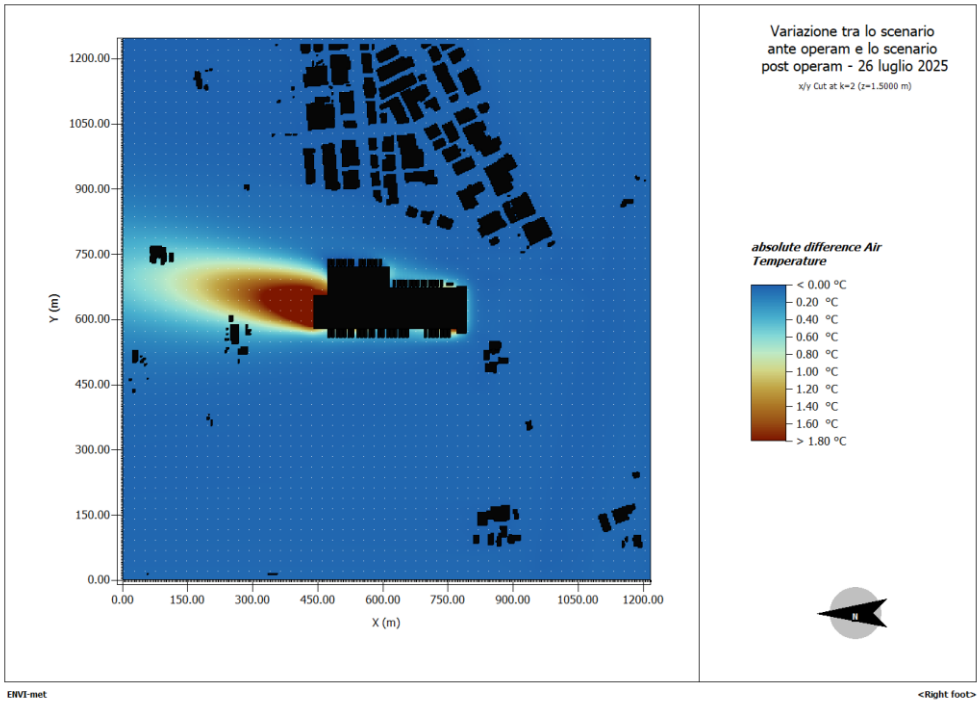


Figura 14 Variazione della temperatura dell'aria al 26 luglio 2025

5.1.1 Variazione media annuale della temperatura dell'aria

Per completare l'analisi delle variazioni microclimatiche riportate al §5.1, è stata elaborata una rappresentazione della variazione media annuale della temperatura dell'aria. L'elaborazione ha l'obiettivo di fornire una sintesi spaziale dell'effetto associato all'esercizio del Data Center, considerando la frequenza con cui si sono verificate nel 2025 diverse condizioni termiche, anziché riferirsi a una singola giornata.

A tal fine, i risultati delle tre simulazioni, riportati nel paragrafo precedente, rappresentative delle fasce di temperatura media giornaliera 0–10 °C, 10–20 °C e 20–30 °C sono stati combinati mediante una media pesata. I pesi associati sono rispettivamente pari a 0,3589, 0,3342 e 0,3068 e corrispondono alla frequenza delle giornate appartenenti alle tre fasce nel dataset meteorologico annuale.

La Figura seguente rappresenta pertanto la variazione media annuale della temperatura dell'aria calcolata alla quota di 1,50 m dal suolo e sovrapposta alla base cartografica satellitare dell'area di studio. La distribuzione spaziale evidenzia i valori più elevati in corrispondenza dell'edificio principale e delle aree immediatamente adiacenti alle sorgenti di dissipazione termica. L'effetto si propaga prevalentemente lungo la direzione di dispersione del pennacchio termico, in relazione alla configurazione locale del campo di vento, e si attenua progressivamente all'aumentare della distanza dal confine del Data Center.

Considerando le 154.105 celle contenenti valori validi, la variazione della temperatura dell'aria risulta compresa tra valori sostanzialmente nulli, pari a circa 0 °C, e un massimo di circa 3,3 °C. Tale valore massimo è localizzato all'interno del perimetro di proprietà del Data Center. Il valore medio spaziale calcolato sull'intero dominio è pari a 0,1478 °C, mentre la mediana è pari a 0,0931 °

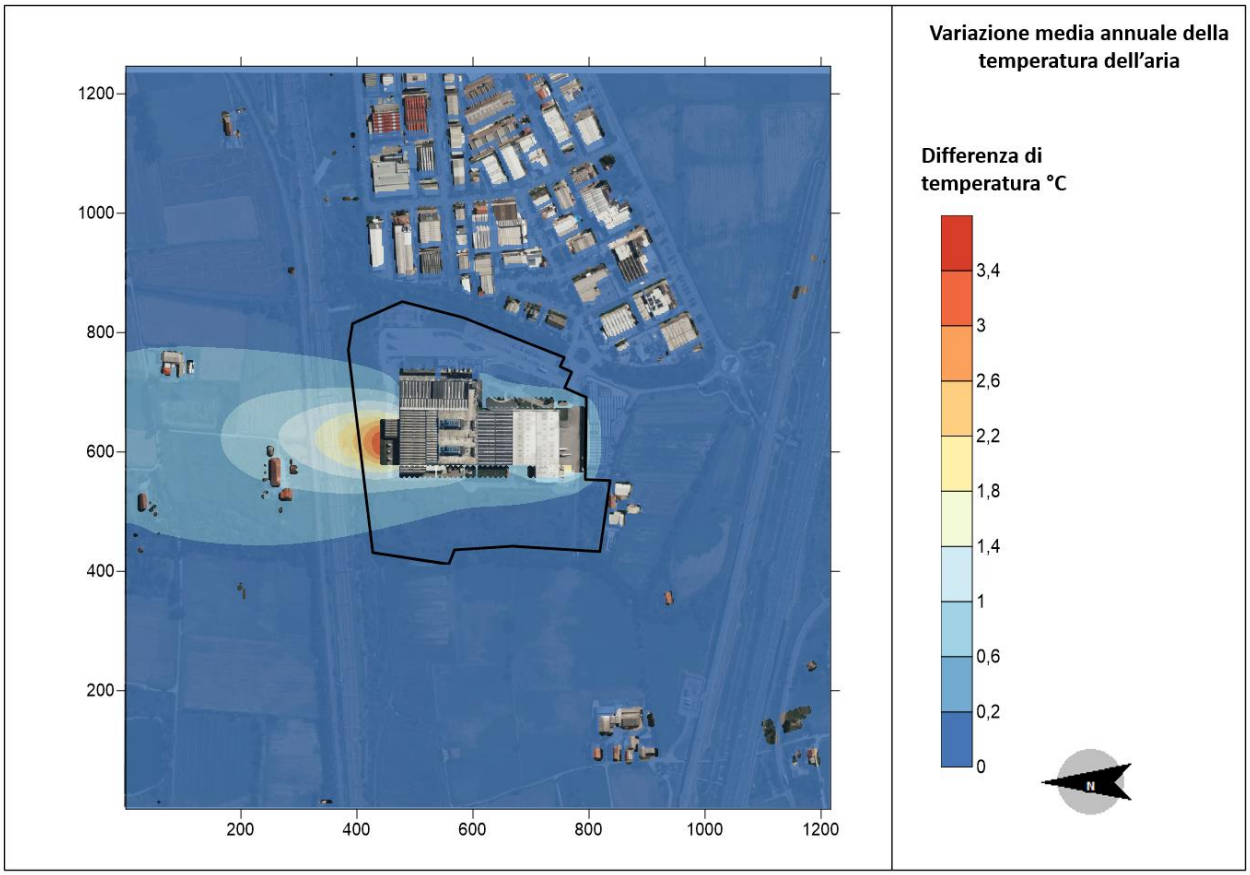


Figura 15 Variazione media annuale della temperatura dell'aria ANNO 2025

Con riferimento alle abitazioni presenti nell'area di studio, la mappa evidenzia una progressiva attenuazione della variazione termica all'aumentare della distanza dal Data Center e dalla direttrice principale di propagazione del pennacchio. Tale distribuzione è influenzata dalle condizioni anemologiche considerate: nell'intervallo orario selezionato, il vento proviene da sud in tutte e tre le giornate simulate, indirizzando il pennacchio verso il medesimo settore sottovento. L'abitazione maggiormente interessata dalla dispersione del calore presenta incremento della temperatura dell'aria indicativamente comprese tra 0,2 °C e 1,0 °C. Per le abitazioni poste al di fuori della fascia principale di propagazione, le variazioni risultano invece contenute e generalmente comprese tra 0 °C e 0,2 °C.

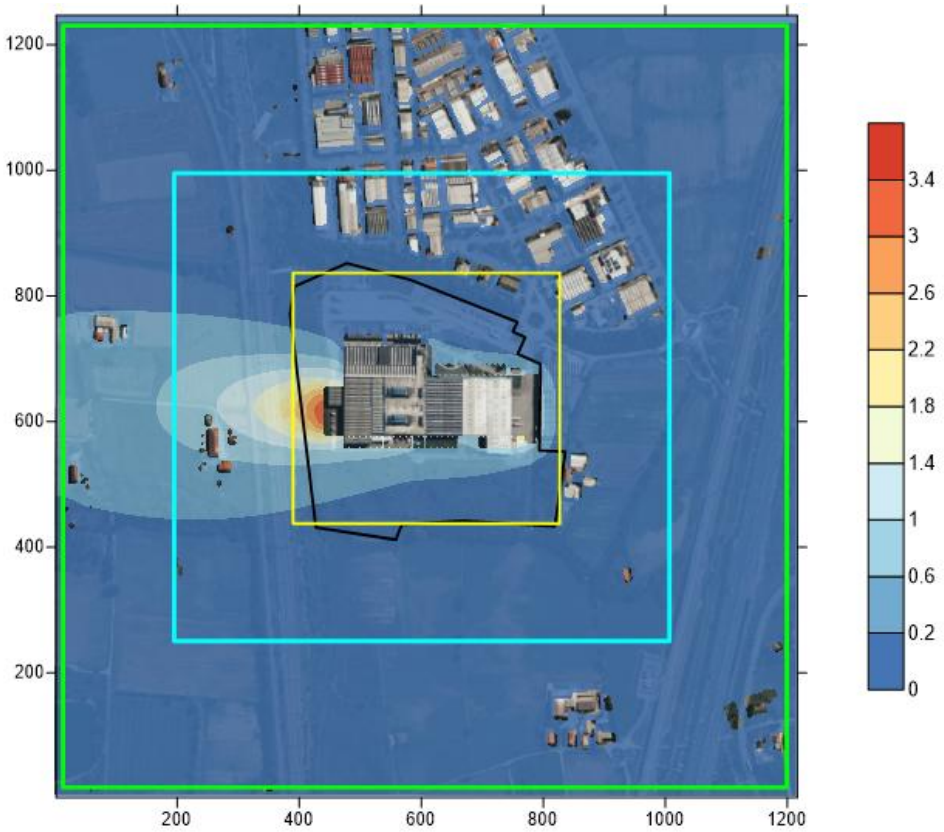


Figura 16 variazione spaziale della temperatura dell'aria ANNO 2025 – areali concentrici

Il risultato medio annuale è stato rielaborato per definire valori di impatto medi su tre aree concentriche a distanza variabile dall'area di progetto. Il primo ambito di estensione di 400 metri di lato comprende esclusivamente il perimetro dell'impianto (area gialla), il secondo un ambito prossimo all'istallazione ma comprendente i primi recettori potenzialmente impattati con estensione di 800 metri e l'ultimo ambito è il dominio intero di calcolo pari a 1200 metri di lato.

Tabella 3 variazione media annuale della temperatura per ambito territoriale.

Ambito territoriale	DT media annuale
400 metri	0,319 °C
800 metri	0,207 °C
1200 metri	0,148 °C

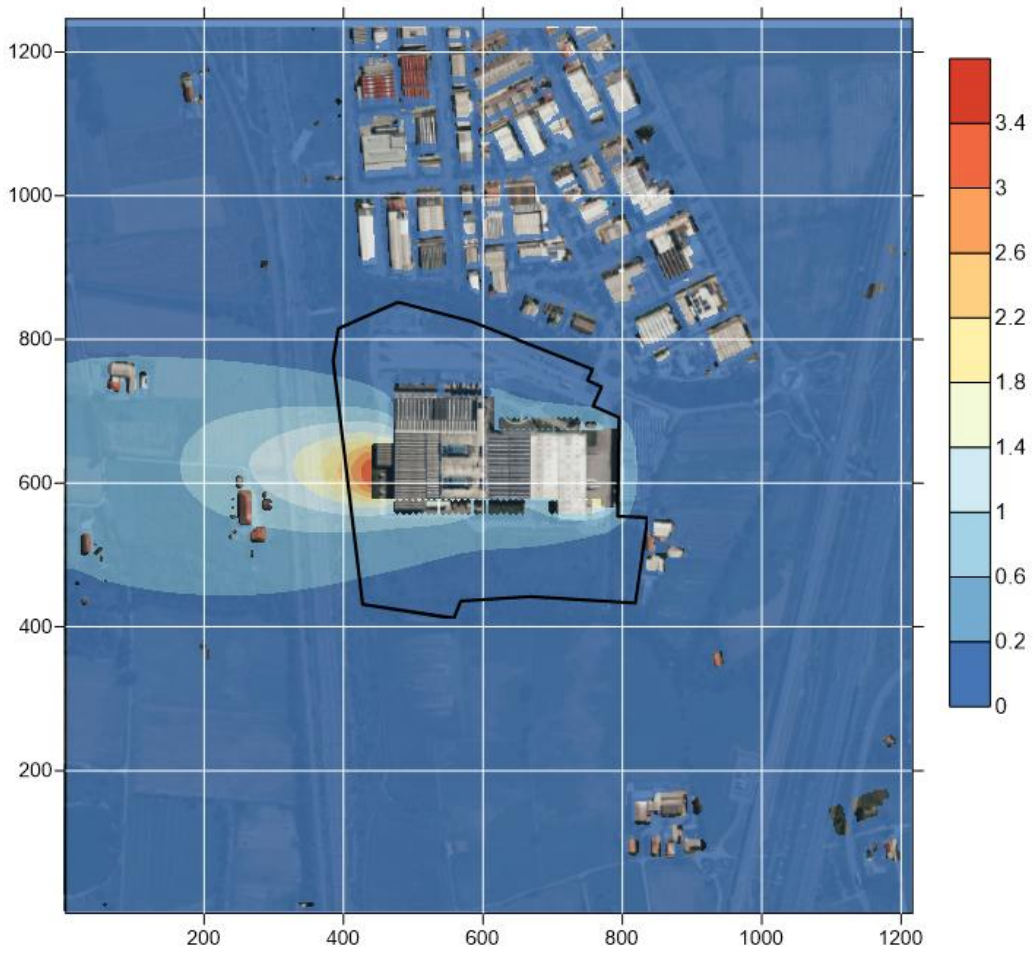


Figura 17 variazione spaziale della temperatura dell'aria ANNO 2025 - celle

I risultati della simulazione media annuale sono stati elaborati al fine di definire l'estensione dell'impatto significativo. Di seguito una elaborazione che mostra come già a distanza di 200 metri del perimetro dell'impianto i valori di variazione di temperatura siano del tutto trascurabili ovvero dell'ordine di 1/100 di grado.

Y\X	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200
1000-1200	0.037406	0.070505	0.124372	0.125006	0.076361	0.094655
800-1000	0.062726	0.074657	0.099922	0.125357	0.106185	0.107125
600-800	0.360921	0.684685	0.557980	0.180683	0.104868	0.124646
400-600	0.285443	0.469425	0.412386	0.223083	0.088258	0.121675
200-400	0.072041	0.066583	0.057283	0.058762	0.077157	0.118115
0-200	0.030056	0.039014	0.049739	0.072436	0.100139	0.120548

Si ribadisce che la valutazione è stata sviluppata assumendo condizioni cautelative, come descritto nel Paragrafo 3.7 relativo alle assunzioni di calcolo. I risultati ottenuti rappresentano pertanto una stima prudenziale rispetto alle condizioni ordinarie di esercizio del Data Center.

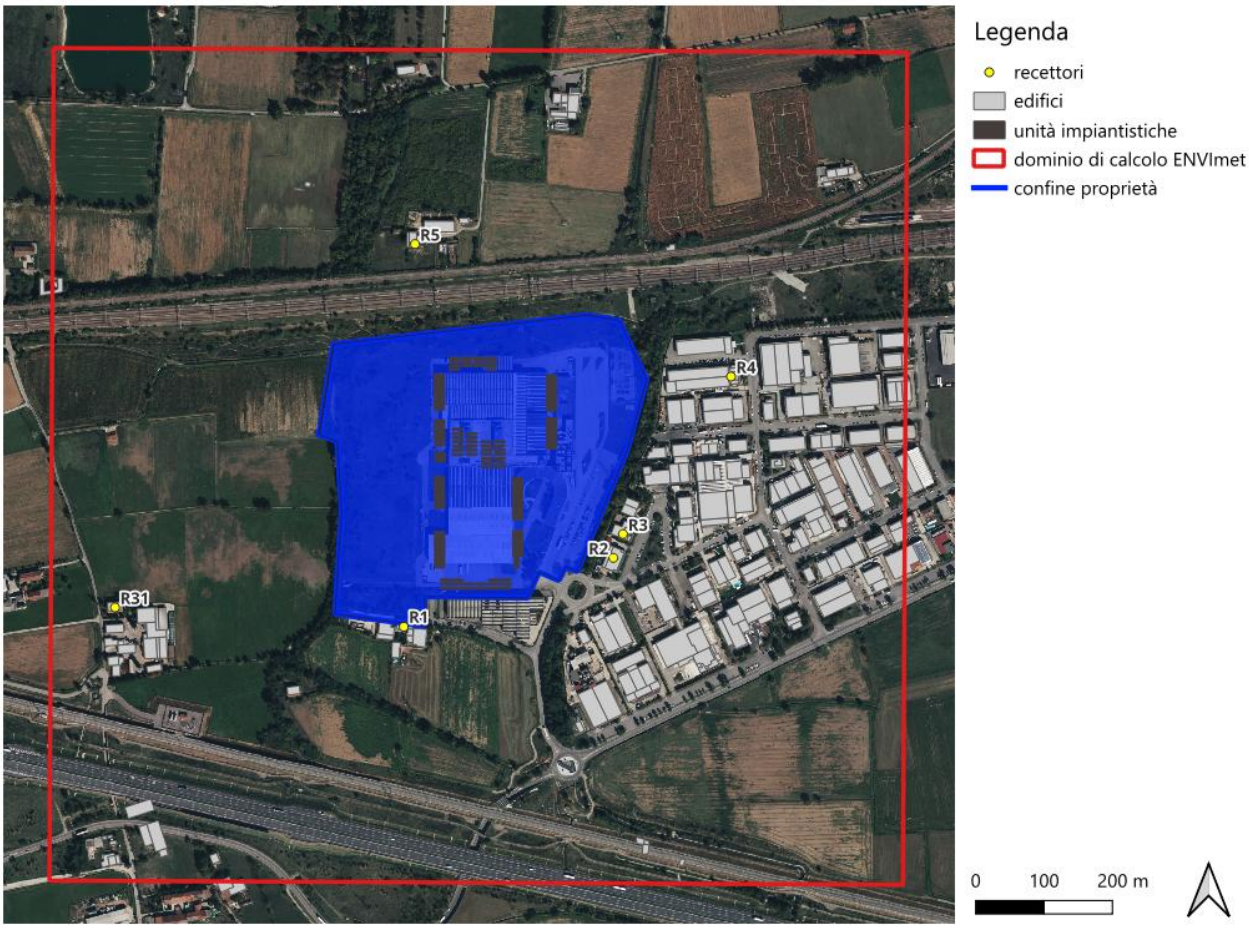


Figura 18 variazione spaziale della temperatura dell'aria ANNO 2025 - recettori

5.1.2 Variazione della temperatura dell'aria ai recettori

A integrazione dell'analisi areale, i risultati sono stati esaminati anche in corrispondenza dei recettori presenti nel dominio. Per ciascun recettore è stata calcolata, negli scenari ante operam e post operam, la temperatura media dei sei istanti compresi tra le ore 16:00 e le 16:50; i valori ottenuti per le tre giornate simulate sono stati quindi combinati utilizzando gli stessi pesi adottati per la griglia annuale. L'estrazione è stata effettuata alla prima quota d'aria valida restituita dal modello, poiché alle quote inferiori alcune colonne ricadono all'interno degli edifici. Le quote considerate sono pari a 1,50 m per R1, 4,50 m per R5, 7,50 m per R3, R4 e R31 e 10,50 m per R2.

Le differenze medie pesate tra lo scenario post operam e quello ante operam risultano pari a 0,06 °C per R1, 0,09 °C per R2, 0,08 °C per R3, 0,08 °C per R4, 0,45 °C per R5 e 0,08 °C per R31. Ad eccezione di R5, che presenta l'incremento più elevato, le variazioni calcolate presso i recettori risultano pertanto comprese in un intervallo ristretto, indicativamente compreso tra 0,06 °C e 0,09 °C.

Recettore	Quota (m)	Temperatura media pesata ANTE (°C)	Temperatura media pesata POST (°C)	ΔT POST–ANTE (°C)
R1	1.50	23.145	23.202	+0.057
R2	10.50	22.805	22.892	+0.086
R3	7.50	22.872	22.956	+0.084
R4	7.50	22.731	22.809	+0.078
R5	4.50	22.225	22.672	+0.446
R31	7.50	22.882	22.962	+0.080

5.1.3 Scenario post operam – sistemazione a verde

Per valutare l'efficacia del progetto delle sistemazioni e verde, è stato effettuato un confronto tra lo scenario post operam descritto in precedenza e quello con le sistemazioni a verde completamente sviluppate. La differenza tra i due scenari consente di quantificare la riduzione della temperatura dell'aria attribuibile esclusivamente alla presenza della vegetazione, indipendentemente dalla variazione complessiva tra ante operam e post operam.

Il confronto è stato svolto alla quota di 1,50 m dal suolo, considerando la differenza assoluta di temperatura tra i due scenari. I risultati permettono quindi di individuare sia la distribuzione spaziale dell'effetto di raffrescamento sia le aree in cui la vegetazione determina la maggiore riduzione della temperatura.

La figura mostra che l'effetto del verde in progetto si concentra soprattutto in prossimità dell'edificio principale e lungo la direzione di propagazione del pennacchio termico. La diminuzione della temperatura risulta generalmente contenuta, ma raggiunge localmente valori superiori a 0,13 °C. Nelle aree più lontane dall'edificio e non direttamente interessate dal pennacchio, le differenze tra i due scenari risultano invece prossime allo zero soprattutto in relazione all'effetto trascurabile della variazione di temperatura a queste distanze. Tra le giornate analizzate, il 28 giugno 2025 rappresenta la condizione più critica per l'incremento della temperatura dell'aria e, di conseguenza, quella in cui l'effetto assoluto della vegetazione risulta maggiormente significativo.

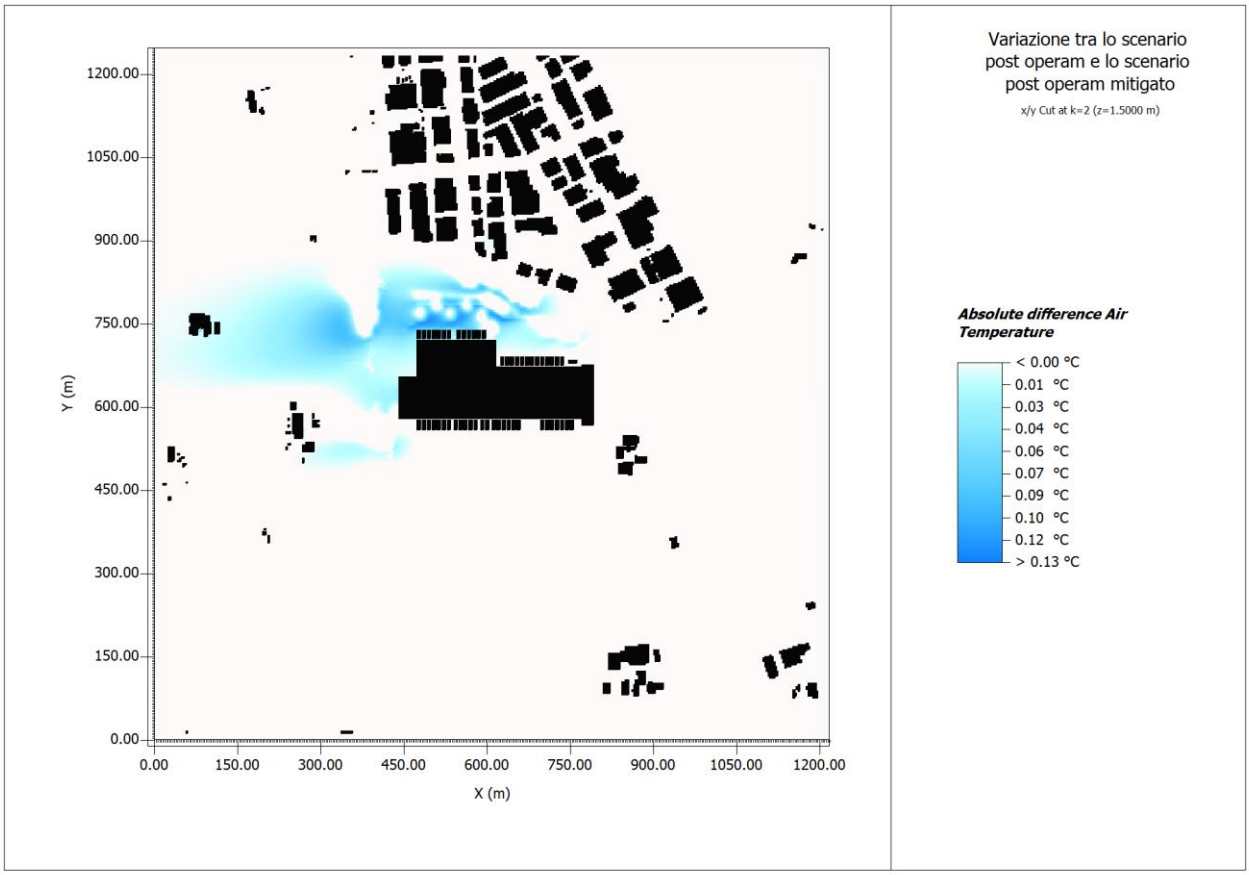


Figura 19 Riduzione della temperatura dell'aria dovuta alla vegetazione nello scenario del 28 giugno 2025

5.2 Umidità relativa

Le mappe della variazione dell'umidità relativa evidenziano, per le tre date analizzate, una zona di maggiore riduzione in corrispondenza dell'edificio principale e delle aree immediatamente adiacenti alle sorgenti di dissipazione termica. La distribuzione presenta una forma prevalentemente allungata, condizionata dalla direzione e dall'intensità del vento, e si sviluppa verso l'esterno dell'area edificata seguendo la direzione di propagazione del pennacchio termico.

Per il 25 marzo 2025, la riduzione più marcata dell'umidità relativa si osserva in prossimità dell'edificio principale, con valori inferiori a −4,5%. Allontanandosi dalla zona centrale, la diminuzione si attenua progressivamente, fino a raggiungere valori prossimi allo zero nella maggior parte del dominio.

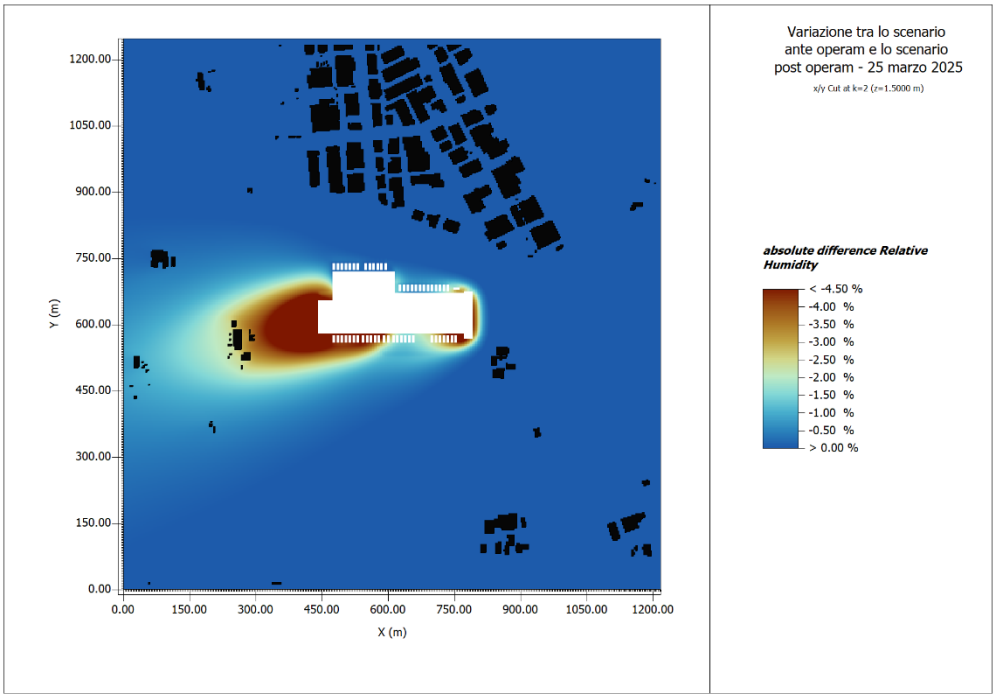


Figura 20 Variazione dell'umidità relativa dell'aria al 25 marzo 2025

La mappa del 28 giugno 2025 mostra una distribuzione analoga, con la maggiore riduzione dell'umidità relativa localizzata in prossimità dell'edificio principale e una fascia più estesa di valori intermedi lungo la direzione di dispersione del pennacchio. Anche in questo caso, l'entità della variazione tende a diminuire progressivamente allontanandosi dalle sorgenti termiche.

Sebbene il 28 giugno rappresenti la condizione meteorologica più gravosa ai fini dell'incremento della temperatura dell'aria, la corrispondente riduzione dell'umidità relativa risulta localmente più contenuta rispetto agli altri casi analizzati. Tale comportamento è riconducibile alla relazione non lineare tra temperatura e umidità relativa e alla diversa combinazione, nella giornata considerata, tra contenuto iniziale di vapore acqueo, ventilazione e rimescolamento dell'aria. La condizione più critica per l'incremento termico

non coincide pertanto necessariamente con quella caratterizzata dalla maggiore diminuzione percentuale dell'umidità relativa.

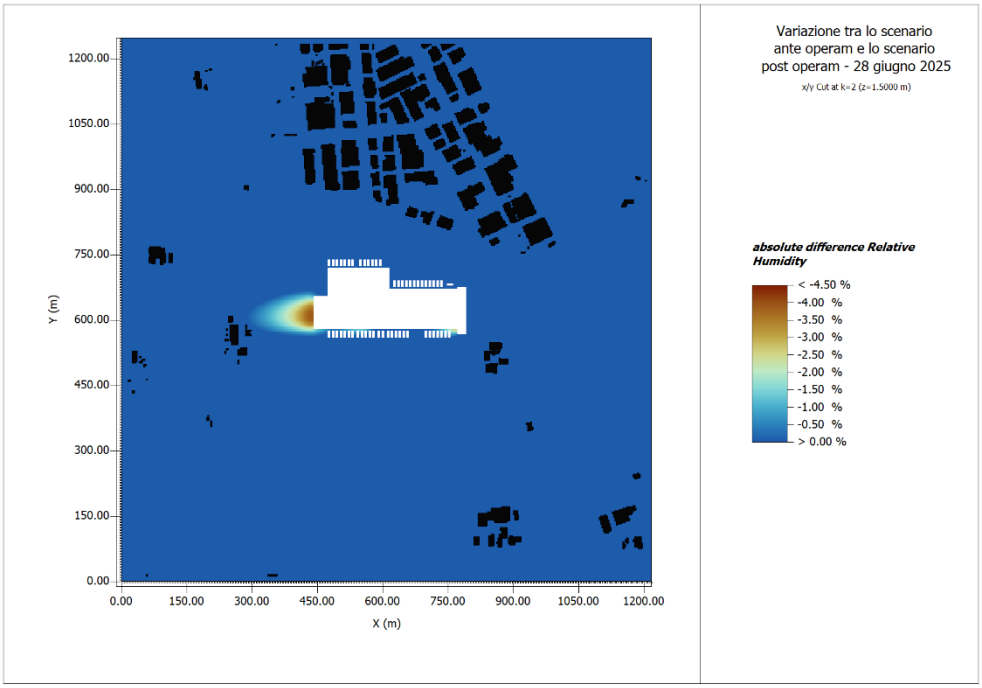


Figura 21 Variazione dell'umidità relativa dell'aria al 28 giugno 2025

Per il 26 luglio 2025 si riconosce una configurazione spaziale comparabile, caratterizzata da una fascia allungata di maggiore riduzione dell'umidità relativa adiacente all'edificio principale. I valori diminuiscono gradualmente verso le aree esterne al pennacchio, dove la variazione risulta più contenuta.

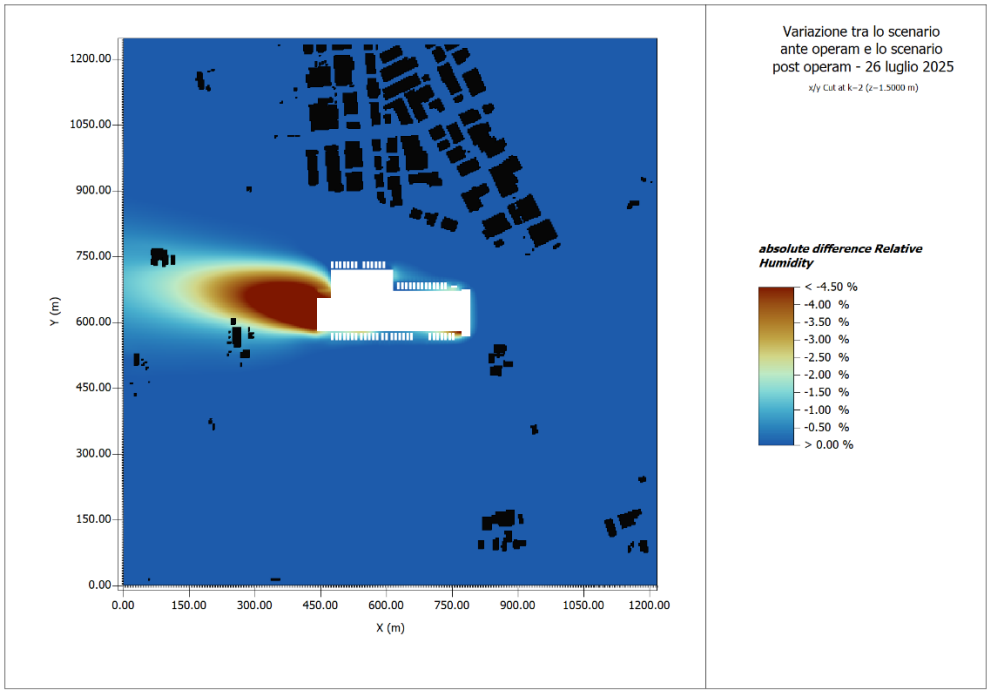


Figura 22 Variazione dell'umidità relativa dell'aria al 26 luglio 2025

5.2.1 Variazione media annuale dell'umidità relativa

La variazione media annuale dell'umidità relativa è stata determinata applicando ai tre risultati giornalieri la stessa procedura di media pesata descritta nel sottoparagrafo precedente. La griglia ottenuta rappresenta la distribuzione spaziale della variazione dell'umidità relativa alla quota di 1,50 m dal suolo ed è sovrapposta alla base cartografica satellitare dell'area di studio.

Rispetto alla temperatura dell'aria, l'umidità relativa mostra le riduzioni più marcate in corrispondenza dell'edificio principale e delle sorgenti di dissipazione termica. Tale comportamento è riconducibile alla relazione tra temperatura dell'aria, contenuto di vapore acqueo e pressione di saturazione. L'umidità relativa è infatti definita dal rapporto percentuale tra la pressione parziale effettiva del vapore acqueo e la pressione di saturazione alla temperatura dell'aria. Quando il pennacchio termico riscalda l'aria senza apportare una quantità proporzionale di vapore acqueo, la pressione di saturazione aumenta, mentre la pressione parziale del vapore rimane sostanzialmente invariata. Di conseguenza, l'umidità relativa diminuisce anche in assenza di una variazione significativa del contenuto assoluto di vapore acqueo.

La riduzione dell'umidità relativa si distribuisce secondo una fascia allungata, orientata prevalentemente lungo la direzione di dispersione del pennacchio. Il trasporto advettivo e la turbolenza atmosferica favoriscono infatti la propagazione e il successivo rimescolamento dell'aria riscaldata con quella circostante. L'intensità della variazione diminuisce progressivamente allontanandosi dall'area impiantistica, per effetto della diluizione del pennacchio, della diffusione turbolenta e degli scambi di calore con il suolo e con gli strati atmosferici adiacenti. Nelle aree esterne al pennacchio prevalgono invece variazioni prossime allo zero o

debolmente positive, dove l'effetto del riscaldamento prodotto dall'impianto risulta trascurabile rispetto alla variabilità locale delle condizioni termoigrometriche.

Considerando le 154.105 celle contenenti valori validi, la variazione dell'umidità relativa è compresa tra circa −7,5 e +1,2 punti percentuali. Il valore medio spaziale è pari a +0,7492 punti percentuali, mentre la mediana è pari a +0,9125 punti percentuali. Il valore minimo rappresenta la maggiore riduzione locale dell'umidità relativa in prossimità delle sorgenti termiche. I valori positivi, più diffusi nelle aree esterne al pennacchio, determinano invece il valore medio complessivo della griglia.

Le abitazioni ricadenti nella porzione interessata dal pennacchio possono pertanto essere soggette a una riduzione dell'umidità relativa più evidente rispetto a quelle esterne alla sua area di propagazione. Questo comportamento riflette il carattere prevalentemente sensibile della dissipazione termica prevista dal progetto: l'aumento della temperatura dell'aria, in assenza di un corrispondente apporto di vapore acqueo, determina localmente una diminuzione dell'umidità relativa.

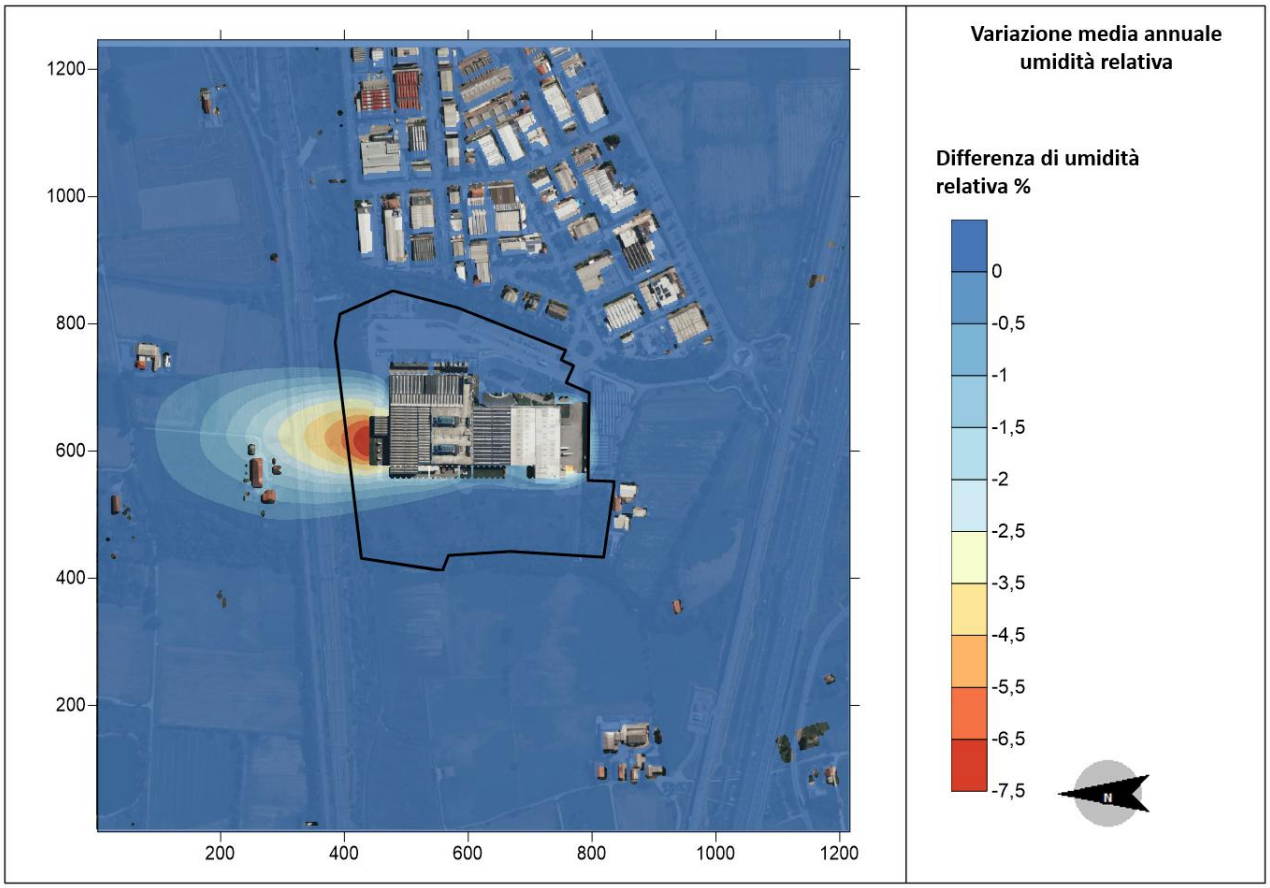


Figura 23 Variazione media annuale umidità relativa – ANNO 2025

6 CONCLUSIONI

Lo studio ha analizzato le possibili variazioni delle condizioni microclimatiche associate alla realizzazione e all'esercizio del Data Center, con particolare riferimento alla temperatura dell'aria e all'umidità relativa. La valutazione è stata condotta mediante il modello tridimensionale ENVI-met, utilizzando tre giornate rappresentative delle principali condizioni termiche dell'anno 2025: il 25 marzo, il 26 luglio e il 28 giugno. Per ciascuna giornata sono stati confrontati lo scenario ante operam e lo scenario post operam, mantenendo coerenti la geometria del dominio, la griglia di calcolo e i profili meteorologici applicati mediante la modalità Full Forcing.

Lo studio è stato impostato con assunzioni cautelative, associando la condizione più gravosa (utilizzo dell'intervallo orario più caldo per ciascuna giornata considerata) a tutte le ore dell'anno appartenenti alla corrispondente fascia termica, e assegnando una potenza termica costante alle sorgenti, rappresentativa di condizioni di funzionamento peggiorative.

Le variazioni di temperatura dell'aria risultano localizzate principalmente in corrispondenza dell'edificio principale e delle sorgenti di dissipazione termica. La loro distribuzione assume una forma allungata, determinata dal trasporto del calore lungo la direzione prevalente del vento, e si attenua progressivamente allontanandosi dall'area impiantistica. La sintesi annuale, ottenuta mediante la combinazione pesata delle tre giornate secondo la frequenza delle rispettive fasce di temperatura, mostra variazioni comprese indicativamente tra 0 °C e 3,3 °C; il valore massimo è localizzato all'interno del confine di proprietà del Data Center.

Le abitazioni ricadenti nella porzione interessata dal pennacchio termico possono presentare variazioni positive della temperatura dell'aria indicativamente comprese tra 0,2 °C e 1,0 °C. Nelle abitazioni esterne al pennacchio, invece, le variazioni risultano generalmente più contenute, comprese tra 0 °C e 0,2 °C. Questo evidenzia che l'effetto termico che si estende oltre il perimetro dell'impianto mantiene un carattere localizzato e fortemente decrescente con la distanza dalle sorgenti: esternamente al perimetro dell'impianto, entro un raggio di 400m dallo stesso la variazione media di temperatura è dell'ordine di 0,2°C, e si riduce a 0,1°C a distanza di 800m.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, le riduzioni più marcate si osservano nelle stesse aree interessate dai maggiori incrementi di temperatura. Il fenomeno è associato al riscaldamento dell'aria senza un corrispondente apporto di vapore acqueo e si manifesta con maggiore intensità all'interno del pennacchio termico. La variazione media annuale dell'umidità relativa risulta compresa tra circa −7,5 e +1,2 punti percentuali. Il valore medio positivo è determinato dalla prevalenza, sull'intero dominio, di variazioni prossime allo zero o debolmente positive, mentre le riduzioni più significative rimangono concentrate nelle aree prossime alle sorgenti.

7 BIBLIOGRAFIA

- Bruse, M., Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software, 13(3–4), 373–384.
- ENVI-met GmbH (2026). ENVI-met 6.0. Technical documentation and model reference.
- Sailor, D. J., et al. (2026). Data Center Waste Heat as an Emerging Urban Thermal Hazard: First Field Measurements of Neighborhood-Scale Air Temperature Impacts. ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities, 7(2), 024501.
- Marinoni, A., Lio', P., Cambria, E., Dal Zilio, L., Lin, W., Dalla Mura, M., Chanussot, J., Ragusa, E., Mengaldo, G., Tso, C. Y., Zhu, Y., & Horton, B. (2026). The data heat island effect: quantifying the impact of AI data centers in a warming world. arXiv:2603.20897.
- Electric Power Research Institute — EPRI. (2024). Data Center Heat Recovery. Technical Brief.
- European Data Centre Association — EUDCA. (2024). An Introduction to Data Centre Heat Reuse. White Paper, Technical Committee.
- EOLIOS Ingénierie. (s.d.). External CFD Simulation for Data Center. Technical note / engineering case material.
- Wang, A., Li, X.-X., Xin, R., & Chew, L. W. (2023). Impact of Anthropogenic Heat on Urban Environment: A Case Study of Singapore with High-Resolution Gridded Data. Atmosphere, 14(10), 1499.
- Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustaoui, M., & Wang, M. (2014). Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 5949–5965.
- Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. International Journal of Climatology, 31, 189–199.
- Ouyang, W., Sinsel, T., Simon, H., Morakinyo, T. E., Liu, H., & Ng, E. (2022). *Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies: Experience from a subtropical climate*. Building and Environment, 207, 108427.

ALLEGATO 1

Dati di dissipazione del calore degli impianti